



**Pedro Miguel Gomes dos Santos Sereno Sanfona**

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

## **Aplicação de Geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controlo das Soldaduras.**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil- Perfil Construção

Orientadora: Doutora Madalena Barroso, Investigadora Auxiliar, LNEC

Co-orientadora: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar Convidada, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutora Maria Teresa G. Santana, Professora Auxiliar,  
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa

Arguente: Doutora Maria da Graça Lopes, Professora Coordenadora  
Principal, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa

Vogal: Doutora Simona Fontul, Professora Auxiliar, Faculdade de  
Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Outubro, 2018**



## **Aplicação de Geomembranas de PVC em Barragens: Influência da Temperatura no Controlo das Soldaduras**

Copyright © Pedro Miguel Gomes dos Santos Sereno Sanfona, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



# Agradecimentos

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o contributo de várias pessoas e entidades, às quais expresso todo o meu agradecimento.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), agradeço o fato de me ter acolhido e dado todas as condições para realizar este trabalho.

Às empresas Sotecnisol e Carpi, agradeço a cedência do material utilizado na componente experimental desta dissertação.

O meu forte agradecimento às minhas orientadoras, as Engenheiras Madalena Barroso e Simona Fontul, por toda a orientação, disponibilidade, compreensão e amizade, durante a realização deste trabalho. Agradeço-lhes, também, a oportunidade de ter realizado esta dissertação no LNEC.

Aos técnicos de laboratório do LNEC, Valter Nascimento e Carlos Martins, agradeço todo o auxílio na componente experimental desta dissertação.

Aos meus amigos, agradeço todos os momentos de amizade e partilha, ao longo de todo este percurso.

A toda a minha família, agradeço todo o apoio e incentivo ao longo de todos estes anos de percurso académico. Em especial à minha avó, pelo seu carinho e preocupação, e ao meu cunhado Etienne por toda a disponibilidade em ajudar numa fase delicada desta dissertação.

À Flávia, agradeço o fato de estar sempre ao meu lado, tornando a minha vida sempre melhor. Agradeço-lhe toda a compreensão, apoio e incentivo ao longo de todo o meu percurso académico.

À minha irmã Carolina, agradeço por ser um exemplo para mim e por nunca duvidar do meu valor. A ela o meu sincero agradecimento por estar sempre disponível para me apoiar.

Por fim, e mais importante, agradeço ao meu pai Carlos e à minha mãe Palmira, por toda o amor, dedicação, compreensão e principalmente por todo o esforço durante os últimos anos.

A todos, do fundo do coração, MUITO OBRIGADO.



# Resumo

---

As geomembranas de PVC são as mais utilizadas na impermeabilização de barragens. O sucesso de um sistema de impermeabilização com geomembranas depende muito da qualidade com que as soldaduras são executadas. Estas devem ser avaliadas em termos de continuidade/estanqueidade e de resistência mecânica, sendo a última através de ensaios de arranque e de corte.

Neste trabalho, avaliou-se a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras de geomembranas de PVC. Este aspeto é importante porque, por vezes, em campo, não é possível assegurar a realização dos ensaios à temperatura normalizada de 23°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), levantando questões sobre a aceitação/rejeição das mesmas.

Foram ensaiadas três geomembranas (1,5, 2,0 e 3,0 mm de espessura) ao arranque, com soldadura por termofusão, uma simples e duas duplas, de acordo com a norma ASTM D 6392, a temperaturas variando entre os 5°C e os 41 °C.

Verificou-se que a força de arranque das soldaduras de geomembranas de PVC não variou significativamente, no máximo 4 kN/m, sugerindo que a temperatura tem reduzida influência no valor desta força. Este comportamento poderá residir na estrutura molecular amorfa do PVC, o qual apresenta um módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea do material, compreendida entre os - 20°C e os - 25°C.

Os resultados obtidos foram, também, comparados com resultados relatados na bibliografia para geomembranas de PEAD, as quais apresentam uma notória diminuição da força de arranque das soldaduras com o aumento da temperatura. As diferenças observadas parecem estar relacionadas com a estrutura molecular dos dois tipos de geomembranas.

Analisou-se, igualmente, o tipo de rotura, tendo sido difícil a sua classificação com base na norma, o que levanta questões relativamente à sua utilidade nos critérios de aceitação/rejeição para soldaduras em geomembranas de PVC.

**Termos-chave:** barragens, sistemas de impermeabilização, geomembranas de PVC, soldaduras, força de arranque, temperatura.





# Abstract

---

The PVC geomembranes are the most common used for dams. The success of a waterproofing system with geomembranes depends on the quality with which the seams are made. The seams have to be evaluated in terms of continuity/watertightness and mechanical strength, the latter being assessed by peel and shear tests.

In this work, the influence of the temperature on the peel strength of the PVC geomembrane seams is studied. This issue is important because, sometimes in the field, it is not possible to carry out the tests at the standard temperature of 23°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ), raising questions on their acceptance / rejection.

Three geomembranes (1.5, 2.0 and 3.0 mm thickness), one with a single and two with a double thermo-fusion seams, were evaluated by peel tests according to ASTM D 6392 standard, at temperatures ranging from 5°C to 41 °C.

Results showed that the peel strength of the PVC geomembrane seams did not change significantly (maximum 4 kN/m), suggesting that the temperature has small influence on the strength value. This behavior can be attributed to the amorphous molecular structure of the PVC, which exhibits a relatively constant modulus of elasticity at temperatures above the glass transition temperature of the material, ranging from - 20°C to - 25 ° C.

The results obtained were also compared with results reported in the literature for HDPE geomembranes. The latter show a clear decrease in the peel strength of the welds with increasing temperature. The differences found seem to be related with the differences on molecular structure of these type of geomembranes.

The locus-of-break codes of the seams, according the ASTM standard, were also studied. Mode of specimens rupture obtained are not included in the standard, raising questions about its usefulness within the acceptance/rejection criteria for PVC geomembranes.

**Keywords:** dams, waterproofing systems, PVC geomembranes, seams, peel strength, temperature.

---



# Conteúdo

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 ENQUADRAMENTO .....  | 1         |
| 1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO .....   | 2         |
| 1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....   | 2         |
| <b>2. ASPETOS RELEVANTES SOBRE GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS .....</b>                             | <b>5</b>  |
| 2.1 INTRODUÇÃO .....   | 5         |
| 2.2 TIPOS DE GEOMEMBRANAS .....  | 6         |
| 2.3 PROPRIEDADES DAS GEOMEMBRANAS .....  | 10        |
| 2.3.1 Propriedades físicas .....   | 13        |
| 2.3.2 Propriedades mecânicas.....  | 14        |
| 2.3.3 Propriedades hidráulicas.....  | 19        |
| 2.3.4 Propriedades térmicas.....   | 19        |
| 2.3.5 Propriedades relativas à durabilidade .....  | 20        |
| 2.4 LOCALIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS NO CORPO DE UMA BARRAGEM .....                                | 22        |
| 2.5 GEOMEMBRANAS NA CONSTRUÇÃO DE NOVAS BARRAGENS .....  | 23        |
| 2.5.1 Geomembranas no paramento de montante .....  | 23        |
| 2.5.2 Geomembranas colocadas internamente no corpo da barragem.....                            | 27        |
| 2.5.3 Vantagens e inconvenientes das diferentes localizações .....                             | 29        |
| 2.6 GEOMEMBRANAS NA REABILITAÇÃO DE BARRAGENS .....  | 30        |
| 2.7 ANCORAGENS .....   | 32        |
| 2.8 SOLDADURAS .....   | 35        |
| 2.8.1 Continuidade/estanquidade das soldaduras .....   | 37        |
| 2.8.2 Resistência mecânica das soldaduras .....  | 39        |
| 2.9 GEOMEMBRANAS MAIS USADAS EM BARRAGENS .....  | 40        |
| 2.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 43        |
| <b>3. PRINCIPAIS DESENVOLVIMENTOS SOBRE A APLICAÇÃO DE<br/>GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS .....</b> | <b>45</b> |
| 3.1 INTRODUÇÃO .....   | 45        |
| 3.2 DURABILIDADE .....   | 45        |
| 3.3 FUGAS.....   | 53        |
| 3.4 REQUISITOS DE INSTALAÇÃO .....   | 56        |
| 3.4.1 Soldaduras .....   | 56        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.4.2     | Dobras.....   | 61         |
| 3.4.3     | Condições da superfície de apoio .....                              | 68         |
| 3.5       | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 69         |
| <b>4.</b> | <b>TRABALHO EXPERIMENTAL .....</b>                                  | <b>71</b>  |
| 4.1       | INTRODUÇÃO .....  | 71         |
| 4.2       | MATERIAIS .....   | 72         |
| 4.3       | MÉTODO .....  | 73         |
| 4.4       | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....                       | 76         |
| 4.4.1     | Influência da temperatura na força de arranque das soldaduras ..... | 76         |
| 4.4.2     | Influência da espessura na força de arranque das soldaduras.....    | 80         |
| 4.4.3     | Análise dos tipos de rotura .....                                   | 81         |
| 4.4.4     | Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras .....                | 82         |
| 4.4.5     | Comparação entre as geomembranas de PVC e PEAD.....                 | 83         |
| 4.5       | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 85         |
| <b>5.</b> | <b>CONCLUSÕES .....</b>   | <b>87</b>  |
| 5.1       | PRINCIPAIS CONCLUSÕES .....   | 87         |
| 5.2       | TRABALHOS FUTUROS .....   | 89         |
|           | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                             | <b>90</b>  |
|           | <b>ANEXOS.....</b>  | <b>97</b>  |
|           | <b>ANEXO A1 – GEOSSINTÉTICOS.....</b>                               | <b>97</b>  |
|           | Anexo A1.1 - Geossintéticos em barragens .....                      | 101        |
|           | Anexo A1.2 - Tipos de geossintéticos .....                          | 97         |
|           | Anexo A1.3 - Funções dos geossintéticos .....                       | 103        |
|           | <b>ANEXO A2 – TIPOS DE BARRAGENS .....</b>                          | <b>105</b> |
|           | Anexo A2.1 - Barragens de aterro .....                              | 105        |
|           | Anexo A2.2 - Barragens de betão.....                                | 107        |
|           | Anexo A2.3 - Barragens de BCC (Betão Compactado com Cilindros)..... | 109        |
|           | <b>ANEXO A3 – RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS.....</b>            | <b>111</b> |

# Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 2.1 - TIPOS DE GEOMEMBRANAS. ....   | 6  |
| FIGURA 2.2 - CONFIGURAÇÕES DAS GEOMEMBRANAS POLIMÉRICAS NA IMPERMEABILIZAÇÃO DE BARRAGENS (ICOLD, 2010).....           | 9  |
| FIGURA 2.3 - CURVAS TENSÃO - DEFORMAÇÃO DE GEOMEMBRANAS (ADAPTADO DE CARNEIRO, 2009). ....                             | 14 |
| FIGURA 2.4 - ENSAIO DE PUNÇAMENTO ESTÁTICO (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). ....  | 15 |
| FIGURA 2.5 - PROVETE PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA INICIAL AO RASGAMENTO (ADAPATDO DE COLMANETTI, 2006). ....       | 16 |
| FIGURA 2.6- EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO REBENTAMENTO (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). ....          | 17 |
| FIGURA 2.7 - MEDIDAS E CONSIDERAÇÕES GEOMÉTRICAS (CM) (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). ....                             | 18 |
| FIGURA 2.8 - ESQUEMA DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA AO CORTE (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). ....                            | 18 |
| FIGURA 2.9 - EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA FLEXIBILIDADE A BAIXAS TEMPERATURAS (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). .... | 20 |
| FIGURA 2.10 - EXTRATOR SOXHLET (ADAPTADO DE COLMANETTI, 2006). ....  | 21 |
| FIGURA 2.11 - GEOMEMBRANA TOTALMENTE COBERTA (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 25 |
| FIGURA 2.12 - GEOMEMBRANA PARCIALMENTE COBERTA (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 25 |
| FIGURA 2.13 - EXEMPLO DE GEOMEMBRANA COBERTA NUMA BARRAGEM DE BCC (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....                      | 26 |
| FIGURA 2.14- GEOMEMBRANA EXPOSTA NUMA BARRAGEM DE ATERRO (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....                               | 26 |
| FIGURA 2.15 - GEOMEMBRANA EXPOSTA NUMA BARRAGEM DE BCC (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....                                 | 27 |
| FIGURA 2.16 - GEOMEMBRANA INTERNA INCLINADA (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....  | 27 |
| FIGURA 2.17 - GEOMEMBRANA INTERNA VERTICAL (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 28 |
| FIGURA 2.18 - GEOMEMBRANA INTERNA QUASI-VERTICAL DE MAIORES DIMENSÕES (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....                  | 28 |
| FIGURA 2.19 - GEOMEMBRANA INTERNA QUASI - VERTICAL COM ZIG ZAG DE MENORES DIMENSÕES (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....    | 28 |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 2.20 - GEOMEMBRANA NA REABILITAÇÃO DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM CORTINA DE BETÃO A MONTANTE (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....                             | 30  |
| FIGURA 2.21 - EXEMPLO DE UMA GEOMEMBRANA EXPOSTA PARA REABILITAÇÃO DE BARRAGENS (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....  | 31  |
| FIGURA 2.22 - SISTEMA WATERSTOP (ADAPTADO DE CAZZUFFI ET AL., 2010). ....  | 322 |
| FIGURA 2.23 - ANCORAGEM SUPERFICIAL EM LINHA (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 33  |
| FIGURA 2.24 - ANCORAGEM MECÂNICA USADA EM REABILITAÇÃO DE BARRAGENS DE BETÃO (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 34  |
| FIGURA 2.25 - SELO PERIFÉRICO APLICADO DE FORMA SUBMERSÍVEL (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....  | 35  |
| FIGURA 2.26 - SOLDADURA POR TERMOFUSÃO (ADAPTADO DE BARROSO & LOPES, 2008). ....   | 37  |
| FIGURA 2.27 - SOLDADURA POR EXTRUSÃO (ADAPTADO DE BARROSO & LOPES, 2008). ....   | 37  |
| FIGURA 2.28 - ENSAIO DE CONTINUIDADE DE PRESSÃO DE AR (ADAPTADO DE BARROSO & LOPES, 2008). ....  | 38  |
| FIGURA 2.29- ENSAIOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA AO ARRANQUE E AO CORTE (ADAPTADO DE BARROSO & LOPES, 2008). ....  | 39  |
| FIGURA 2.30 - GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....  | 40  |
| FIGURA 2.31- GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE ATERRO (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 411 |
| FIGURA 2.32 - GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE BETÃO (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ...  | 41  |
| FIGURA 2.33 - GEOMEMBRANAS EM BARRAGENS DE BCC (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). ....   | 41  |
| FIGURA 3.1 - DOBRA (ADAPTADO DE CHAPPEL ET AL., 2008). ....  | 61  |
| FIGURA 3.2 - EQUILÍBRIO E GEOMETRIA DE UMA DOBRA (ADAPATADO DE GIROUD, 2005). ....   | 62  |
| FIGURA 3.3 - QUANTIFICAÇÃO DE DOBRAS ATRAVÉS DO MÉTODO DE FOTOGRAFIA AÉREA A BAIXA ALTITUDE E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS (ADAPTADO DE TAKE ET AL., 2007). .... | 64  |
| FIGURA 4.1 – GEOMEMBRANAS UTILIZADAS. ....   | 73  |
| FIGURA 4.2 - PROVETES UTILIZADOS. ....   | 74  |
| FIGURA 4.3 - ENSAIO DE ARRANQUE. ....  | 75  |
| FIGURA 4.4 – TIPOS DE ROTURA (ASTM D 6392). ....   | 76  |
| FIGURA 4.5 - GEOMEMBRANA A: RELAÇÃO ENTRE A FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS E A TEMPERATURA. ....   | 77  |
| FIGURA 4.6 - GEOMEMBRANA B: RELAÇÃO ENTRE A FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS E A TEMPERATURA. ....   | 77  |
| FIGURA 4.7 - GEOMEMBRANA C: RELAÇÃO ENTRE A FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS E A TEMPERATURA. ....   | 78  |

|  |     |
|--|-----|
| FIGURA 4.8 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO MÓDULO DE ELASTICIDADE DE POLÍMEROS AMORFOS E SEMICRISTALINOS .....                      | 79  |
| FIGURA 4.9 - FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS DAS GEOMEMBRANAS A, B E C – INFLUÊNCIA DA ESPESSURA. ....                            | 80  |
| FIGURA 4.10 – TIPO DE ROTURA OBTIDO PARA A GEOMEMBRANA A. ....   | 81  |
| FIGURA 4.11 - TIPO DE ROTURA OBTIDO PARA A GEOMEMBRANA B. ....   | 82  |
| FIGURA 4.12 - TIPO DE ROTURA OBTIDO PARA A GEOMEMBRANA C. ....   | 82  |
| FIGURA 4.13 - FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS A DIFERENTES TEMPERATURAS PARA GEOMEMBRANAS DE PVC E PEAD (LOPES ET AL., 2006)..... | 84  |
| FIGURA A1.1 - CLASSIFICAÇÃO DOS GEOSSINTÉTICOS SEGUNDO A EN ISO 10318.....   | 98  |
| FIGURA A1.2 – EXEMPLO DE GEOTÊXTIL TECIDO.....   | 99  |
| FIGURA A1.3 – EXEMPLO DE GEOMEMBRANA DE PEAD.....  | 99  |
| FIGURA A1.4 – EXEMPLO DE GEOGRELHA.....  | 99  |
| FIGURA A1.5 – EXEMPLO DE GEORREDE.....   | 100 |
| FIGURA A1.6 – EXEMPLO DE GEOCÉLULAS.....   | 100 |
| FIGURA A1.7 – EXEMPLO DE GEOCOMPÓSITO DRENANTE.....  | 101 |
| FIGURA A1.8 - CONSTITUIÇÃO GENÉRICA DE UM SISTEMA EXPOSTO NUMA BARRAGEM DE ATERRO (ADAPTADO DE ICOLD, 2010).....                   | 102 |
| FIGURA A1.9 - FUNÇÕES DOS GEOSSINTÉTICOS (NORMA NP EN ISO 10318).....  | 104 |
| FIGURA A2.1 - BARRAGEM DE PERFIL HOMOGÉNEO DO SALGUEIRO, PORTUGAL (ADAPTADO DE MELO, 2016).....                                    | 105 |
| FIGURA A2.2 - BARRAGEM DE PERFIL ZONADO DE ALIJÓ, PORTUGAL (ADAPTADO DE MELO, 2016).....   | 106 |
| FIGURA A2.3 - BARRAGEM DE ENROCAMENTO DO PEGO DO ALTAR, PORTUGAL (ADAPTADO DE MELO, 2016).....                                     | 106 |
| FIGURA A2.4 - BARRAGEM DE TERRA E ENROCAMENTO DO VALE DO GAIO, PORTUGAL (ADAPTADO DE MELO, 2016).....                              | 106 |
| FIGURA A2.5 – BARRAGEM GRAVIDADE DO TORRÃO, PORTUGAL.....  | 108 |
| FIGURA A2.6 - BARRAGEM ABÓBADA DA CANIÇADA, PORTUGAL.....  | 108 |
| FIGURA A2.7 - BARRAGEM DE CONTRAFORTES DA PRACANA, PORTUGAL.....   | 109 |
| FIGURA A2.8 - BARRAGEM DE ABÓBADAS MÚLTIPLAS DA AGUIEIRA, PORTUGAL.....  | 109 |
| FIGURA A2.9 - BARRAGEM DE BCC DE PEDROGÃO, PORTUGAL.....   | 110 |





# Lista de Tabelas

|   |     |
|---|-----|
| TABELA 2.1 - PRINCIPAIS POLÍMEROS UTILIZADOS EM GEOMEMBRANAS (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). .....   | 7   |
| TABELA 2.2 - FORMULAÇÃO DE ALGUNS TIPOS DE GEOMEMBRANAS (ADAPTADO DE KOERNER & HSUAN, 2003). .....  | 10  |
| TABELA 2.3 - PROPRIEDADES DAS GEOMEMBRANAS E NORMAS DE ENSAIO (ADAPTADO DE NEVES <i>ET AL</i> , 2015). .....  | 12  |
| TABELA 2.4 - LOCALIZAÇÃO DAS GEOMEMBRANAS NO CORPO DE UMA BARRAGEM. ....  | 23  |
| TABELA 2.5 – VANTAGENS NA APLICAÇÃO DE GEOMEMBRANAS NO PARAMENTO DE MONTANTE E DE GEOMEMBRANAS INTERNAS (ADAPTADO DE ICOLD, 2010). .....                                    | 29  |
| TABELA 2.6– APLICABILIDADE DOS MÉTODOS DE SOLDADURA PARA DIFERENTES GEOMEMBRANAS (ICOLD, 2010).....   | 36  |
| TABELA 2.7 - ENSAIOS DE CONTINUIDADE DE SOLDADURAS E RESPECTIVAS NORMAS PARA GEOMEMBRANAS DE PVC E PEAD. ....   | 38  |
| TABELA 2.8 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE GEOMEMBRANAS (ADAPTADO DE VERTEMATTI, J. C., 2004). .....   | 42  |
| TABELA 3.1 - ENSAIOS LABORATORIAIS E RESPECTIVAS NORMAS (ADAPTADO DE CAZZUFFI, 2014). .....   | 48  |
| TABELA 3.2 - PREVISÃO DO TEMPO DE VIDA DE GEOMEMBRANAS DE PEAD COBERTAS, EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA (ADAPTADO DE KOERNER ET AL., 2017). ....                                  | 51  |
| TABELA 3.3 - PREVISÃO DO TEMPO DE VIDA DE GEOMEMBRANAS EXPOSTAS, A 20°C, COM BASE NA PERDA DE 50% DE PROPRIEDADES MECÂNICAS (ADAPTADO DE KOERNER <i>ET AL</i> , 2017). .... | 51  |
| TABELA 3.4 - CONDIÇÕES DE SOLDADURA (ADAPTADO DE ZHANG ET AL., 2017). .....   | 57  |
| TABELA 3.5 - PRESSÃO DE AR NECESSÁRIA NO CANAL PARA GARANTIR A FORÇA DE ARRANQUE ESPECIFICADA PARA GEOMEMBRANAS DE PVC DE 0,75 MM. ....                                     | 60  |
| TABELA 3.6 - INFLUÊNCIA DO TIPO, COR E TEXTURA DE UMA GEOMEMBRANA NA FORMAÇÃO DE DOBRAS (ADAPTADO DE GIROUD, 2005).....   | 63  |
| TABELA 3.7 - MÉTODOS DE PROMOÇÃO DE MAIOR CONTATO ENTRE A GEOMEMBRANA E O MATERIAL SUBJACENTE (ADAPTADO DE GSI WHITE PAPER #27, 2013). .....                                | 66  |
| TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DAS GEOMEMBRANAS USADAS, DE ACORDO COM AS FICHAS TÉCNICAS. ....  | 72  |
| TABELA A3.1 - GEOMEMBRANA A: FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS INTERIORES A DIFERENTES TEMPERATURAS. ....  | 111 |

|   |     |
|---|-----|
| TABELA A3.2 - GEOMEMBRANA A: FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS EXTERIORES A DIFERENTES TEMPERATURAS..... | 111 |
| TABELA A3.3 - GEOMEMBRANA B: FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS INTERIORES A DIFERENTES TEMPERATURAS..... | 112 |
| TABELA A3.4 - GEOMEMBRANA B: FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS EXTERIORES A DIFERENTES TEMPERATURAS..... | 112 |
| TABELA A3.5 - GEOMEMBRANA C: FORÇA DE ARRANQUE DAS SOLDADURAS A DIFERENTES TEMPERATURAS.....            | 113 |

# Abreviaturas

ASTM – American Society for Testing Materials

BAM - Federal Institute for Materials and Testing

BCC- Betão Compactado com Cilindros

CEN – European Committee of Standardization

CSPE - Polietileno clorosulfonado

EN – European Norm

EPDM - Copolímero de etileno-propileno-monómero

FGI – Fabricated Geomembrane Institute

GSI – Geosynthetic Institute

ICOLD – International Commission on Large Dams

IGS – International Geosynthetics Society

ISO – International Organization for Standardization

MARM – Ministério de Medio Ambiente y Medio Rural e Marino

NP – Norma Portuguesa

NSF – National Sanitation Foundation

PEAD – Polietileno de alta densidade

PEBD – Polietileno de baixa densidade

PELBD – Polietileno linear de baixa densidade

PP – Polipropileno

PVC – Policloreto de vinilo

SIGM – Sistema de Impermeabilização com Geomembranas





# Introdução

## 1.1 Enquadramento

As alterações climáticas são uma das maiores ameaças ambientais do século XXI com consequências profundas em várias áreas da sociedade, como por exemplo, a escassez de água potável que, segundo dados do *Pacific Institute*, representa apenas 0,6% de toda a água disponível no planeta.

Existe a necessidade urgente de encontrar alternativas para o uso sustentável deste recurso que caminha para o seu limite de exploração, sendo fundamental o seu armazenamento sem desperdícios e para o qual a eficiente impermeabilização de barragens pode contribuir.

Atualmente, a impermeabilização de barragens pode ser conseguida através do recurso a sistemas de impermeabilização com geomembranas (SIGM). Estes sistemas incluem um conjunto de geossintéticos, cada um com uma função específica, dos quais se destaca a geomembrana com a função de barreira. Informações mais detalhadas sobre os tipos de geossintéticos e os SIGM podem ser encontradas no Anexo A1.1. e A1.2, respetivamente.

A utilização de geomembranas como barreira em barragens tem sido uma tecnologia em crescimento, levando à substituição de materiais tradicionais, como a argila, o betão ou o betão betuminoso. De acordo com Koerner (2005), a rápida evolução na aplicação destes materiais deve-se à sua rapidez de instalação, à existência de controlo de qualidade apertado na produção e ao facto de os custos serem competitivos em relação a outros materiais de construção.

O comportamento das geomembranas em barragens tem sido alvo de diversos estudos, em diferentes domínios como, por exemplo, a durabilidade, a ocorrência de fugas, a formação de dobras, etc. Contudo outros aspetos importantes carecem de investigação, nomeadamente, a

influência da temperatura ambiente na resistência mecânica das soldaduras, cuja qualidade é determinante para um adequado desempenho do SIGM, sendo, por isso, objeto de estudo na presente dissertação.

## **1.2 Objetivos da dissertação**

O principal objetivo desta dissertação consiste na avaliação da influência da temperatura ambiente na resistência mecânica das soldaduras de geomembranas de PVC. Este aspeto é estudado neste trabalho, uma vez que, em campo, por vezes, não é possível assegurar a realização dos ensaios de resistência mecânica de controlo de qualidade das soldaduras à temperatura normalizada, levantando questões sobre a aceitação/rejeição das mesmas.

Outro objetivo desta dissertação consiste em compilar os principais desenvolvimentos sobre a aplicação de geomembranas em barragens, visando compreender o estado atual do conhecimento sobre a aplicação destes materiais e identificar os principais desafios que se colocam à sua utilização.

## **1.3 Metodologia e estrutura da dissertação**

Numa fase inicial, procede-se à análise da bibliografia existente sobre a aplicação de geomembranas em barragens.

Numa segunda fase, realiza-se um trabalho experimental, com vista a concretizar o principal objetivo desta dissertação.

A dissertação organiza-se em vários capítulos. O presente capítulo enquadra o tema da dissertação, apresenta os seus objetivos e a metodologia de trabalho e a sua organização.

No segundo capítulo apresentam-se os tipos de geomembranas, bem como as suas principais propriedades. Abordam-se, também, as diferentes localizações que uma geomembrana pode assumir no corpo de uma barragem, bem como a sua utilização em novas estruturas ou na reabilitação de estruturas existentes. Finalmente apresentam-se aspetos bastante importantes para o bom desempenho das geomembranas instaladas em barragens, nomeadamente as ancoragens e as soldaduras.

O terceiro capítulo engloba os principais desenvolvimentos sobre a aplicação de geomembranas em barragens, particularmente sobre durabilidade, ocorrência de fugas e

requisitos de instalação, nomeadamente as soldaduras, as dobras e as condições da superfície de apoio.

O quarto capítulo é dedicado ao trabalho experimental. Descrevem-se os materiais e os métodos utilizados, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos, bem como as principais conclusões.

Por fim, no quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas com a realização desta dissertação, bem como sugestões de futuros trabalhos relacionados com o tema abordado.





## **Aspetos relevantes sobre geomembranas em barragens**

### **2.1 Introdução**

A construção e exploração de uma barragem compreende questões ambientais, decisões políticas e apresenta vantagens e inconvenientes, tanto a nível social, como económico, pelo que têm sido feitos imensos esforços de forma a otimizar o projeto e o desempenho destas estruturas (Figueira, 2014). Nesse sentido, a otimização dos seus sistemas de impermeabilização assume-se como uma das principais questões, para a qual os desenvolvimentos alcançados na área dos geossintéticos têm contribuído.

Existem diferentes tipos de geossintéticos, entre eles as geomembranas, os geotêxteis, as georredes, as geogrelhas, os geotubos, os geocompósitos, etc. (ver Anexo A1.1). Estes materiais podem desempenhar diferentes funções: barreira, drenagem, filtragem, reforço, separação ou controlo de erosão. Detalhes sobre as funções dos geossintéticos são apresentados no Anexo e A1.3.

Neste trabalho, destacam-se as geomembranas, cuja função é a de barreira. Estes materiais podem ser usados em todos os tipos de barragens, designadamente de aterro, de betão e de betão compactado com cilindros (BCC). Podem ser usadas tanto em novas barragens, como na reabilitação de barragens existente, em diversas localizações no corpo destas estruturas.

Neste capítulo, apresentam-se os principais tipos de geomembranas usadas em barragens, bem como as principais propriedades a ter em conta neste tipo de aplicação. As diferentes localizações que as geomembranas podem assumir no corpo de uma barragem, bem como a sua

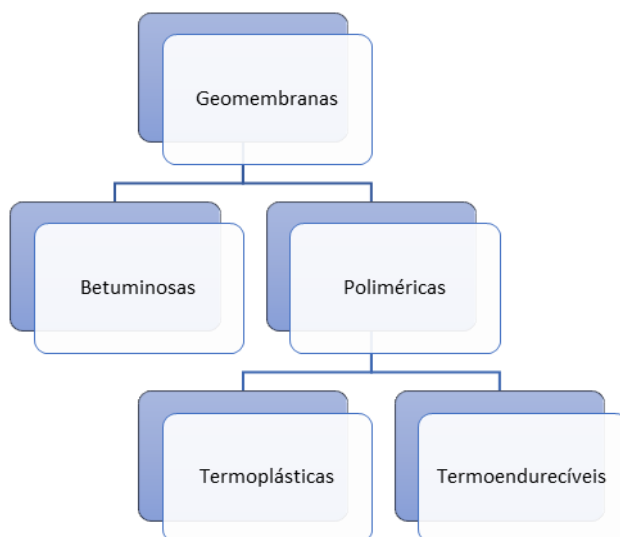
utilização quer na construção de novas barragens, quer em ações de reabilitação de estruturas existentes são também abordados neste capítulo.

Aspetos determinantes para o bom desempenho das geomembranas instaladas em barragens são apresentados, neste capítulo, nomeadamente as ancoragens e as soldaduras.

## 2.2 Tipos de geomembranas

De acordo com a matéria prima utilizada no seu fabrico, é possível classificar as geomembranas como poliméricas ou betuminosas, tal como mostra a Figura 2.1. As geomembranas poliméricas utilizam polímeros sintéticos como matéria prima enquanto as betuminosas resultam da impregnação de geotêxteis com materiais betuminosos. Este trabalho centra-se, sobretudo, na utilização de geomembranas poliméricas que constituem cerca de 91% de toda a utilização de geomembranas em barragens (ICOLD, 2010).

As geomembranas poliméricas, por sua vez, podem ainda ser classificadas em termoplásticas ou termoendurecíveis, de acordo com a deformabilidade dos polímeros que as constituem (Figura 2.1).



**Figura 2.1 - Tipos de geomembranas.**

Os polímeros termoplásticos caracterizam-se pelo fato de puderem ser repetidamente aquecidos até ao seu ponto de fusão, possibilitando a sua moldagem. Este processo é reversível, uma vez que depois de arrefecidos voltam à forma inicial. Estes não apresentam um ponto de

fusão específico, devido às diferenças no seu peso molecular, grau de cristalinidade e à ramificação das suas cadeias moleculares, situando-se entre os 120°C e os 140°C (Malpass, 2010).

Os polímeros termoendurecíveis uma vez deformados depois de aquecidos adquirem uma forma permanente não reversível. Estes têm ainda a particularidade de se degradarem quando sujeitos novamente a altas temperaturas (Reis, 2016).

A Tabela 2.1 mostra os principais polímeros frequentemente utilizados no fabrico de geomembranas.

**Tabela 2.1 - Principais polímeros utilizados em geomembranas (adaptado de ICOLD, 2010).**

| <b>Tipo</b>             | <b>Polímero</b>                          | <b>Abreviatura</b> |
|-------------------------|--|--------------------|
| <b>Termoplástico</b>    | Polietileno*                             | PE                 |
|                         | Policloreto de Vinilo                    | PVC                |
|                         | Polipropileno                            | PP                 |
|                         | Polietileno clorosulfonado**             | CSPE               |
|                         | Polietileno clorado                      | CPE                |
| <b>Termoendurecível</b> | Copolímero de etileno-propileno-monómero | EPDM               |
|                         | Borracha butílica                        | IIR                |
|                         | Borracha nitrílica                       | NBR                |

\*Dependendo da densidade, o polietileno pode ser classificado como mais rígido (Polietileno de alta densidade – PEAD) ou menos rígido (Polietileno linear de baixa densidade – PELBD).

\*\*CSPE pode ser considerado como borracha termoplástica, um material de transição entre o termoplástico e o termoendurecível com a particularidade de apresentar um comportamento termoplástico inicialmente, mas com o passar do tempo se tornar termoendurecível.

Para além da sua deformabilidade, os polímeros podem ainda ser classificados quanto à sua estrutura molecular como amorfos ou cristalinos.

Se as macromoléculas se distribuírem aleatoriamente, sem qualquer tipo de organização, diz-se que a estrutura desse polímero é amorfa. Por outro lado, se as moléculas apresentarem

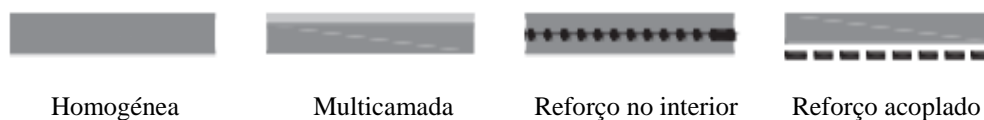
organização tridimensional, segundo uma “malha” bem definida, então o material apresenta uma estrutura cristalina.

Materiais como o PE incluem zonas cristalinas e zonas amorfas, sendo designados por semi-cristalinos. A proporção entre as zonas cristalinas (cristalitos) e as zonas amorfas confere ao polímero o seu grau de cristalinidade que é tanto maior quanto maior for a quantidade de zonas cristalinas relativamente às zonas amorfas (Reis, 2016). Segundo Greenwood *et al.* (2012), a proporção de cristalitos afeta as propriedades físicas, mecânicas e a durabilidade dos polímeros.

Também é possível classificar as geomembranas poliméricas quanto à incorporação ou não de reforço (ICOLD, 2010):

- **Geomembranas não reforçadas:**
  - **Geomembranas homogêneas:** constituídas exclusivamente pelos materiais poliméricos e os respetivos aditivos;
  - **Geomembranas multicamada:** formadas por série de camadas do mesmo ou de diferentes materiais. Esta forma é utilizada para reduzir os custos das geomembranas bem como melhorar algumas propriedades (mecânicas, proteção aos UV). É importante a camada exterior ser bastante resistente á radiação UV;
- **Geomembranas reforçadas:**
  - **Geomembranas com reforço no interior:** reforças com fibras sintéticas, como por exemplo fibras de vidro, de forma a melhorar as propriedades mecânicas ou a estabilidade dimensional das geomembranas, dependendo dos casos;
  - **Geomembranas com reforço acoplado:** reforçadas exteriormente, por exemplo através da aplicação de um geotêxtil sob a geomembrana, de forma a evitar o aparecimento de tensões resultantes do seu processo de fabrico e/ou aumentar a sua resistência mecânica.

A Figura 2.2 representa as várias configurações possíveis de geomembranas poliméricas abordadas anteriormente.



**Figura 2.2 - Configurações das geomembranas poliméricas na impermeabilização de barragem (ICOLD, 2010).**

Para além dos polímeros, as geomembranas incluem também na sua constituição aditivos com as mais variadas finalidades. Estes são misturados com os polímeros, de forma a produzir geomembranas poliméricas, através de um de três processos possíveis: extrusão, calandragem ou espalhamento superficial.

Os aditivos, mais comuns, utilizados na produção de geomembranas, de acordo com a *ICOLD* (2010) são:

- **Plastificantes:** utilizados no fabrico do PVC para conferir flexibilidade ao material; A perda de plastificantes por extração, ou fundamentalmente, por migração, conduz à degradação progressiva das geomembranas pela radiação solar ou pela presença de água, dependendo da natureza dos plastificantes;
- **Cargas:** aditivos sólidos, incorporados de forma a modificar as propriedades físicas do polímero, especialmente as mecânicas. O dióxido de titânio é um exemplo de carga utilizada em geomembranas de PVC;
- **Absorvedores de radiação UV:** utilizados para impedir o rápido envelhecimento das geomembranas; um dos mais utilizados é o **negro de carbono**, que é misturado com a resina em cerca de 2 a 3% no caso dos polietilenos. Estes aditivos devem estar repartidos de forma homogênea ao longo de toda a geomembrana, de forma a não alterar as suas características de uns pontos para outros;
- **Antioxidantes:** utilizados para protegerem o material das altas temperaturas durante o processo de fabrico (por extrusão) e das baixas temperaturas que causam a degradação dos polímeros. A sua importância é extrema, pois enquanto existirem antioxidantes na composição de um polímero, não pode ocorrer o seu envelhecimento; desempenham um papel muito importante nas geomembranas de PEAD;

- **Outros:** pigmentos, lubrificantes, retardadores de chama, estabilizadores de chama, fungicidas, estabilizadores de temperatura, entre outros.

Na Tabela 2.2 é possível observar alguns exemplos da constituição de geomembranas.

**Tabela 2.2 - Formulação de alguns tipos de geomembranas (Adaptado de Koerner & Hsuan, 2003).**

| <b>Tipo</b>  | <b>Resina (%)</b> | <b>Plastificante (%)</b> | <b>Cargas (%)</b> | <b>Negro de carbono (%)</b> | <b>Aditivos (%)</b> |
|--------------|-------------------|--------------------------|-------------------|-----------------------------|---------------------|
| <b>PEAD</b>  | 95-98             | 0                        | 0                 | 2-3                         | 0.25-1              |
| <b>PELBD</b> | 94-96             | 0                        | 0                 | 1-3                         | 0.25-4              |
| <b>fPP</b>   | 85-98             | 0                        | 0-13              | 2-4                         | 0.25-2              |
| <b>PVC</b>   | 50-70             | 25-35                    | 0-10              | 2-5                         | 2-5                 |
| <b>CSPE</b>  | 40-60             | 0                        | 40-50             | 5-10                        | 5-15                |
| <b>EPDM</b>  | 25-30             | 0                        | 20-40             | 20-40                       | 1-5                 |

## 2.3 Propriedades das geomembranas

As propriedades são avaliadas com base em ensaios que podem ser de dois tipos: ensaios índice ou ensaios de comportamento. Os ensaios índice são mais utilizados na identificação, pois permitem avaliar se as características do material estão de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante. Por outro lado, os ensaios de comportamento são concebidos com o objetivo de determinar as propriedades funcionais do material, de forma a obter parâmetros de projeto para efeitos de dimensionamento (Neves *et al.*, 2015). No caso das geomembranas, os ensaios índice mais utilizados são os relativos às propriedades físicas do material, como a determinação da sua espessura, densidade, dureza e massa surfática. Os ensaios de comportamento devem ter em consideração três aspetos importantes: o comportamento da geomembrana, das suas soldaduras e a sua durabilidade. Estes devem avaliar a capacidade de impermeabilização da geomembrana quer durante a instalação quer durante o seu tempo de serviço. Os ensaios às soldaduras devem avaliar a sua qualidade de execução enquanto os ensaios de durabilidade devem estimar o comportamento da geomembrana face às

solicitações a que é exposta durante a sua vida útil (Colmanetti, 2006). No caso de aplicação de geomembranas em barragens, os ensaios de comportamento mais utilizados são relativos a propriedades hidráulicas do material como a permeabilidade; a propriedades mecânicas como a resistência à tração, ao punçoamento, ao rasgamento e ao rebentamento, a resistência das soldaduras e a resistência ao corte entre interfaces; a propriedades térmicas como a flexibilidade a baixas temperaturas; e a propriedades de durabilidade como a resistência ao envelhecimento devido ao clima, microbiológica, à oxidação, entre outras.

Existem normas de ensaio desenvolvidas por diferentes organismos internacionais de normalização, entre os quais o *International Organization for Standardization* (ISO), o *European Committee of Standardization* (CEN) e a *American Society for Testing Materials* (ASTM), para a avaliação das propriedades das geomembranas. Em Portugal, sempre que existentes, utilizam-se as normas europeias desenvolvidas pelo CEN.

De um modo geral, as propriedades das geomembranas podem ser divididas em físicas, mecânicas, hidráulicas, químicas, térmicas e relativas à durabilidade. Na Tabela 2.3 apresentam-se as principais propriedades das geomembranas que usualmente são tidas em conta na sua aplicação em barragens, bem como as respetivas normas de ensaio mais utilizadas.

**Tabela 2.3 - Propriedades das geomembranas e normas de ensaio (Adaptado de Neves *et al*, 2015).**

|                                 | <b>Propriedade</b>   | <b>Norma de ensaio</b>   |
|---------------------------------|--|--|
| <b>Físicas</b>                  | Massa surfática<br>Espessura<br>Massa volúmica<br>Dureza   | EN 1849-2<br>EN 1849-2<br>ISO 1183<br>ISO 868  |
| <b>Mecânicas</b>                | Resistência à tração<br>Resistência ao punçoamento (estático)<br>Resistência ao punçoamento (dinâmico)<br>Resistência ao rasgamento<br>Resistência ao rebentamento<br>Resistência ao corte<br>Resistência das soldaduras     | ISO R 527/ EN 12311-2<br>EN ISO 12236<br>DIN 16726/ NF P 84-506/<br>UNI 8202/12<br>ISO 34-1<br>EN 14151<br>EN ISO 12957<br>ASTM D 6392 |
| <b>Hidráulicas</b>              | Permeabilidade à água<br>Transmissão de vapor de água  | EN 14150<br>EN 12311-2   |
| <b>Químicas</b>                 | Composição química (análise Termogravimétrica)   | EN ISO 11358   |
| <b>Térmicas</b>                 | Flexibilidade a baixas temperaturas<br>Estabilidade dimensional ao calor   | EN 495-5<br>EN 1107-2  |
| <b>Relativas á durabilidade</b> | Resistência ao envelhecimento devido ao clima<br>Resistência à oxidação<br>Resistência microbológica<br>Resistência à penetração por raízes<br>Resistência à lixiviação (solubilidade na água)<br>Extração de plastificantes | EN 12224<br>EN 14575<br>EN 12225<br>CEN TS14416 / EN 13948<br>EN 14415<br>ISO 6427   |



Nas próximas secções serão descritas, de forma geral as principais propriedades acima indicadas (Tabela 2.3), de acordo com Colmanetti (2006).

### **2.3.1 Propriedades físicas**

#### Massa surfática

Esta propriedade é determinada com recurso à norma EN 1849-2. A massa surfática ou massa por unidade de área é expressa em  $\text{g/m}^2$  e consiste na determinação da massa de provetes com área conhecida.

Segundo Lopes & Lopes (2010), importantes indicações sobre o custo das geomembranas, bem como sobre a uniformidade dos produtos podem ser indicados, com base nesta propriedade, quando utilizada na avaliação do controlo de qualidade durante o processo de fabrico.

#### Espessura

A espessura de uma geomembrana consiste na distância, expressa em mm, entre as suas superfícies inferior e superior. A espessura de uma geomembrana é medida em provetes circulares de  $100 \text{ cm}^2$  de área com o auxílio de um micrómetro com precisão de 0,01 mm, fixo a um suporte rígido. Os valores de espessura são retirados após 5 s quando a pressão atinge  $20 \pm 0,2 \text{ kPa}$ , os quais permitem avaliar a compressibilidade do material. A determinação da espessura de uma geomembrana é feita de acordo a norma EN 1849-2.

#### Massa volúmica

A densidade ( $\rho$ ) de uma geomembrana é expressa em  $\text{g/cm}^3$  e consiste no quociente entre a massa ( $m$ ) do material, em gramas, e o volume ( $V$ ) do mesmo, em  $\text{cm}^3$ . A determinação da massa volúmica é obtida de acordo com a norma ISO 1183.

#### Dureza

A dureza de uma geomembrana é avaliada pela sua capacidade em resistir à perfuração de uma pequena sonda com forma e dimensões específicas. Esta propriedade deve ser avaliada de acordo com a norma ISO 868, em provetes circulares de  $100 \text{ cm}^2$  de área com o auxílio de

um durômetro. A dureza é medida após  $15 \pm 1$  s após a aplicação de pressão nos provetes em seis pontos diferentes distanciados entre si menos de 6 mm.

### 2.3.2 Propriedades mecânicas

#### Resistência à tração

A resposta das geomembranas sujeitas a tração é, geralmente, caracterizada pela curva que relaciona a tensão (em MPa), ou seja, a força por unidade de área (em  $\text{kN/m}^2$ ) com as extensões/deformações (em percentagem/ em mm). Os ensaios de resistência à tração devem ser realizados de acordo com a norma ISO R 527. Os provetes utilizados são normalmente em forma de “halter”, indicando a norma outros tipos que também podem ser utilizados, como por exemplo, retangulares. Os ensaios são realizados tanto na direção longitudinal (direção de produção) com na direção transversal da geomembrana, utilizando-se um extensômetro para medir as deformações obtidas nos provetes tracionados a 100 mm/min. Na Figura 2.3, comparam-se as curvas tensão – deformação das geomembranas mais comuns.

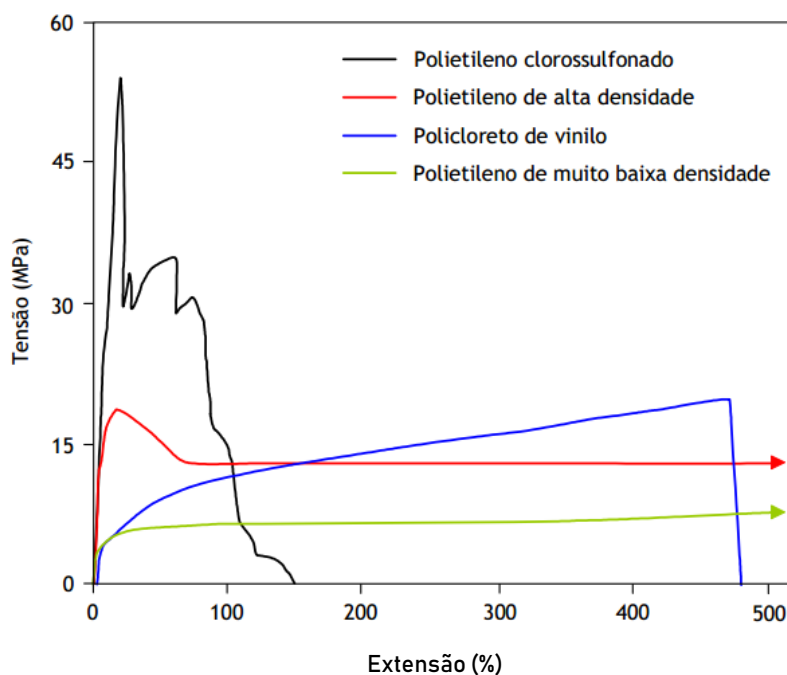


Figura 2.3 - Curvas tensão - extensão de geomembranas (Adaptado de Carneiro, 2009).

Na Figura 2.3, observa-se que em resposta ao aumento de tensão, as geomembranas de PEAD, sendo mais rígidas, apresentam um comportamento elastoplástico, com um ponto de

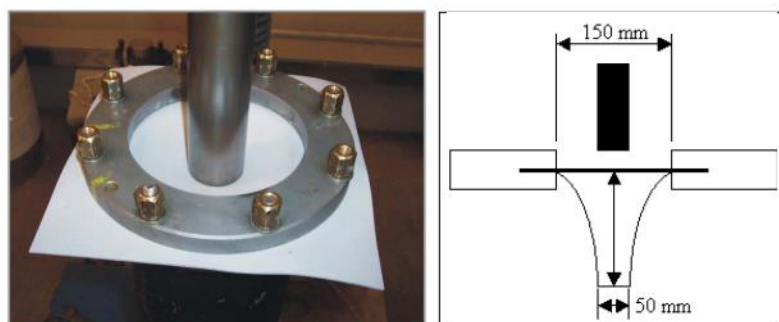
cedência bastante pronunciado (aproximadamente 15%), a partir do qual a tensão diminui progressivamente para valores de extensão superiores a 500%, onde ocorre a ruptura.

As geomembranas de PVC, são mais flexíveis, apresentam um comportamento aproximadamente elástico linear, deformando-se gradualmente em resposta ao aumento de tensão, atingindo a ruptura aos 480% de extensão, aproximadamente.

De forma semelhante, as geomembranas de PELBD também apresentam uma deformação gradual em resposta ao aumento de tensão, mas para valores mais baixos que no caso do PVC. A sua ruptura ocorre para uma extensão superior a 500%.

#### Resistência ao punçoamento estático – Método CBR

A resistência das geomembranas ao punçoamento estático é dada pela força necessária para perfurar a geomembrana, a qual é apresentada como um indicador da capacidade do material em suportar sobre ele um cilindro padrão. A resistência ao punçoamento estático por parte de uma geomembrana é determinada, segundo a norma EN ISO 12236, a qual fornece indicações para a avaliação da resistência da geomembrana à perfuração por parte de um cilindro de diâmetro  $50 \pm 5$  mm, como o observado na Figura 2.4. O ensaio é conduzido em 5 provetes circulares de diâmetro superior a 150 mm, sobre os quais é aplicada força (prensa de 200 kN) a uma velocidade de  $50 \pm 10$  mm/min. Como resultado do ensaio resulta um gráfico que relaciona a força aplicada (kN) com o deslocamento até à ruptura da geomembrana. Geomembranas de PVC apresentam, normalmente, valores de resistência ao punçoamento estático compreendidos entre os 700 N e os 2000 N, para geomembranas não reforçadas, e entre os 1500 N e os 5000 N, para geomembranas com geotêxtil acoplado.



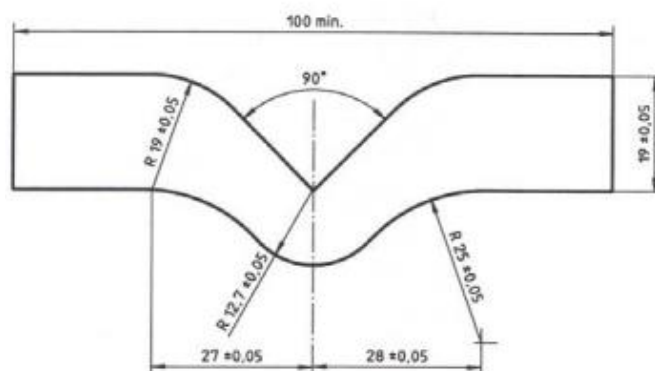
**Figura 2.4 - Ensaio de punçoamento estático (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

### Resistência ao punçoamento dinâmico

A resistência das geomembranas ao punçoamento dinâmico pode ser determinada de acordo com a norma alemã DIN 16726, de acordo com a norma francesa NF P 84-506 ou de acordo com a norma italiana UNI 8202/12. De acordo com a norma italiana UNI 8202/12, a resistência de uma geomembrana ao punçoamento dinâmico é obtida em 12 provetes circulares de diâmetro 250 mm, os quais são apoiados num suporte rígido e sujeitos a dois golpes de punçoamento (energia de impacto de 5 Nm), verificando-se a existência ou não de perfuração. No caso de não se observar qualquer perfuração, os provetes são submetidos a um ensaio de capacidade de retenção de água à pressão de 1 kPa, durante 24 horas. Se existir passagem de água o ensaio é repetido para energias de impacto inferiores (3 e 2 Nm), classificando-se, finalmente, o material de acordo com a maior energia de impacto suportada, sem ocorrência de fugas.

### Resistência ao rasgamento

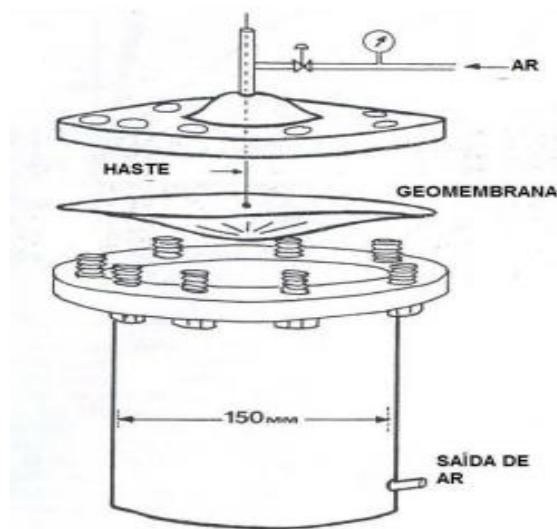
A resistência das geomembranas ao rasgamento pode ser determinada por vários métodos, dependendo o procedimento de ensaio utilizado e o tamanho do provete ensaiado da natureza do material. Para geomembranas poliméricas, a resistência ao rasgamento pode ser avaliada considerando o início do rasgamento ou a sua propagação. O método B da norma ISO 34-1 indica as condições de ensaio para a determinação da resistência inicial ao rasgamento em provetes como o indicado na Figura 2.5. O ensaio deve ser realizado em 10 provetes (5 longitudinais e 5 transversais) a uma velocidade de 500 mm /min.



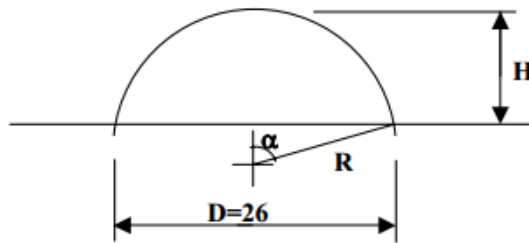
**Figura 2.5 - Proвете para determinação da resistência inicial ao rasgamento (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

### Resistência ao rebentamento

A resistência das geomembranas ao rebentamento é avaliada segundo a norma EN 14151, a qual exige a preparação de três provetes de ensaio de forma circular e diâmetro de 26 cm. Cada provete é sujeito à aplicação gradual de pressão hidráulica até à rotura. As deformações a um volume controlado de  $3 \pm 0,5 \text{ cm}^3/\text{s}$ , são medidas a cada 5 s. Os provetes são previamente perfurados para serem fixados ao equipamento sendo colocados entre os flanges do cilindro superior e o tanque metálico inferior. A haste metálica colocada sobre a geomembrana é dotada de um marco para leitura do deslocamento vertical à medida que a água contida no tanque inferior é pressionada contra a geomembrana, tal como observado na Figura 2.6. Como resultado do ensaio obtém-se uma relação entre a deflexão no centro do provete (a cada 5 s, em mm) e a pressão de injeção de água (em bar). O final do ensaio é caracterizado pela diminuição da pressão de injeção de água, sendo este expresso pelos valores máximos de tensão e de deformação, obtidos de acordo com cálculos a partir de medidas efetuadas e das considerações geométricas observadas na Figura 2.7.



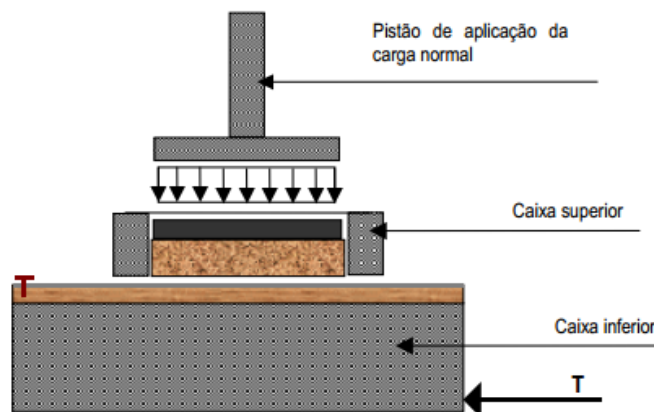
**Figura 2.6- Equipamento para determinação da resistência ao rebentamento (Adaptado de Colmanetti, 2006).**



**Figura 2.7 - Medidas e considerações geométricas (cm) (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

#### Resistência ao corte (entre interfaces)

As características de atrito de uma geomembrana podem ser avaliadas segundo dois ensaios, de acordo com a norma EN ISO 12957: o ensaio de corte direto, segundo a norma EN ISO 12957-1 ou o ensaio do plano inclinado, segundo a norma EN ISO 12957-2. O ensaio de corte direto é o mais utilizado, no qual são colocados em contacto dois materiais diferentes num equipamento que os sujeita a carga normal e a uma força de corte tangencial ( $T$ ), como se pode observar na Figura 2.8.



**Figura 2.8 - Esquema do ensaio de resistência ao corte (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

#### Resistência das soldaduras

A resistência mecânica das soldaduras é avaliada com base em ensaios de corte e arranque, tal como abordado na secção “Soldaduras” deste capítulo.

### 2.3.3 Propriedades hidráulicas

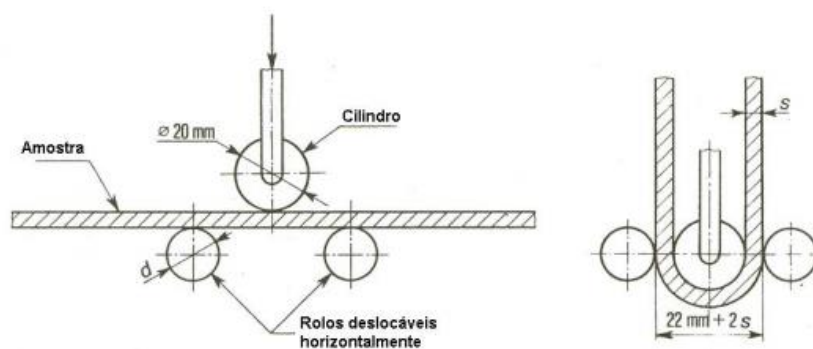
O principal propósito funcional das geomembranas é a impermeabilização, como tal, a propriedade hidráulica mais importante a avaliar é a permeabilidade à água.

A permeabilidade à água de uma geomembrana é determinada de acordo com a norma EN 14150, a qual indica a realização de um ensaio que consiste na medição do fluxo que passa através da geomembrana mediante a aplicação de uma pressão hidráulica diferenciada entre as duas faces da mesma. Durante o ensaio a pressão é mantida nos 100kPa, sendo ajustada a montante e a jusante a 150 kPa e a 50 kPa, respetivamente. O fluxo que atravessa a geomembrana é calculado a partir das variações de líquido medido em cada lado da geomembrana.

### 2.3.4 Propriedades térmicas

#### Flexibilidade a baixas temperaturas

A flexibilidade das geomembranas a baixas temperaturas é determinada pela norma EN 495-5. O objetivo do ensaio consiste em avaliar a suscetibilidade do material às temperaturas a que estará sujeito ao longo da sua vida útil. Para a sua realização são acondicionados 8 provetes (4 longitudinais e 4 transversais) retangulares (50 mm de largura e 100 mm de comprimento) à temperatura de  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa  $50 \pm 5$  %, durante 24 horas. Na Figura 2.9, é possível observar o equipamento utilizado na determinação da flexibilidade das geomembranas a baixas temperaturas. O equipamento e os provetes devem ser colocados durante 5 horas numa câmara fria. Após esse período, os provetes são colocados sobre o cilindro central, como mostra a Figura 2.9, dentro da própria câmara fria, durante 3 s. A primeira determinação é feita para 5°C e, caso não ocorra rotura ou fissuração da geomembrana, a temperatura é reduzida para 0°C e assim sucessivamente em intervalos de redução de 5°C até que se atinga a temperatura à qual a geomembrana apresente rotura ou fissuração. O resultado do ensaio é dado pela temperatura mínima à qual a geomembrana foi dobrada pelo cilindro sem apresentar rotura ou fissuração. Geomembranas de PVC, tipicamente não apresentam “problemas” de flexibilidade até temperaturas de -20°C.



**Figura 2.9 - Equipamento para determinação da flexibilidade a baixas temperaturas (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

#### Estabilidade dimensional ao calor

A estabilidade dimensional ao calor por parte das geomembranas é avaliada de acordo com a norma EN 1107-2, através da realização de um ensaio que consiste na medição das dimensões longitudinais e transversais de três provetes quadrados com 250 mm de lado, antes e após o seu acondicionamento à temperatura de  $80 \pm 2$  °C. Os provetes são previamente mantidos, no mínimo durante 20 horas a uma atmosfera padrão de temperatura  $23 \pm 2$  °C e humidade relativa de  $50 \pm 5$  %. Depois são acondicionados em estufa com ventilação durante 6 horas ( $\pm 15$  min). As leituras das dimensões iniciais e finais são efetuadas com precisão de 0,1 mm. As dimensões finais são obtidas após o acondicionamento em estufa e o recondicionamento na atmosfera padrão durante 60 min. Os resultados são dados pela variação das dimensões longitudinais e transversais, podendo ser positivos ou negativos e expressando a percentagem em relação às dimensões iniciais.

### **2.3.5 Propriedades relativas à durabilidade**

Conforme se pode observar na Tabela 2.3, as principais propriedades relativas à durabilidade são a resistência ao envelhecimento devido ao clima, à oxidação, microbiológica, à penetração por raízes e à lixiviação e a extração de plastificantes, no caso de geomembranas de PVC.

No caso da aplicação de geomembranas em barragens, a extração de plastificantes (aditivos para aumentar a flexibilidade da geomembrana) assume-se como a propriedade mais



importante das mencionadas anteriormente, uma vez que as geomembranas de PVC são bastante utilizadas na impermeabilização deste tipo de estruturas.

Importa referir que, ao longo deste trabalho se utiliza o termo PVC, o qual inclui, por uma questão de simplicidade, o PVC-P (plastificado).

O comportamento a longo prazo de uma geomembrana de PVC é bastante influenciado pela perda de plastificantes causada pela exposição a temperaturas elevadas e às radiações UV. A perda de plastificantes traduz-se, por um lado, pelo aumento da rigidez e da resistência à tração da geomembrana, e por outro lado, pela diminuição da sua extensão na rotura à tração, o que compromete a adaptabilidade do material ao corpo da estrutura, agravando os riscos de danos na geomembrana causados pelo punçoamento, rasgamento ou deslocamentos da própria estrutura. Dessa forma, é bastante importante determinar o teor de plastificantes de uma geomembrana de forma a prever a sua durabilidade. O teor de plastificantes pode ser determinado por diferentes métodos, sendo o mais utilizado o método da extração, no qual, de acordo com a norma ISO 6427, a geomembrana é colocada em contacto com um solvente adequado que não dissolva o polímero base. Para a extração de plastificantes é utilizado um extrator *Soxhlet*, como o observado na Figura 2.10.



**Figura 2.10 - Extrator *Soxhlet* (Adaptado de Colmanetti, 2006).**

O recipiente de armazenamento dos provetes é colocado, previamente, em estufa durante 1 hora à temperatura de 60°C. De seguida, o conjunto é arrefecido à temperatura ambiente e pesado. Aproximadamente 3g de geomembrana são colocados no extrator,

juntamente com o solvente éter etílico, iniciando a extração que dura aproximadamente 8 horas. São realizadas três determinações do teor de plastificante da geomembrana.

## **2.4 Localização das geomembranas no corpo de uma barragem**

As geomembranas podem ser usadas em barragens de aterro, de betão e de betão compactado com cilindros (BCC). No Anexo A2, descrevem-se sumariamente os tipos de barragens abordados. Podem ser usadas tanto em novas barragens, como na reabilitação de barragens existentes, em diversas localizações no corpo das estruturas.

Em barragens de aterro podem localizar-se no paramento de montante, de forma exposta ou coberta, bem como internamente no corpo da barragem.

Nas barragens de betão, são usadas apenas na reabilitação, localizando-se no paramento de montante, de forma exposta.

Em barragens de BCC, localizam-se sempre no paramento de montante, expostas ou cobertas, em novas barragens, e integrando os *waterstops*, na reabilitação.

Na Tabela 2.4 apresentam-se, de forma resumida, as diferentes localizações que as geomembranas podem assumir no corpo de uma barragem consoante o tipo de estrutura e tipo de intervenção.

**Tabela 2.4 - Localização das geomembranas no corpo de uma barragem.**

|                                  | Tipo de intervenção   |   |
|----------------------------------|---|---|
| Tipo de barragem                 | <u>Novas barragens</u>  | <u>Reabilitação</u>   |
| <b><u>Barragem de Aterro</u></b> | <p>No paramento de montante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expostas</li> <li>• Cobertas</li> </ul> <p>Internas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclínadas</li> <li>• Verticais</li> <li>• Quasi-verticais (zig zag)</li> </ul> | <p>No paramento de montante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expostas</li> <li>• Cobertas</li> </ul> <p>(reparação total ou parcial)</p> <p>(substituição ou sobreposição)</p> |
| <b><u>Barragem de Betão</u></b>  |   | <p>No paramento de montante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expostas</li> </ul>   |
| <b><u>Barragem de BCC</u></b>    | <p>No paramento de montante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Expostas</li> <li>• Cobertas</li> </ul>   | <p>No paramento de montante:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Waterstops</i> (para reparação de fissuras)</li> </ul>   |

## 2.5 Geomembranas na construção de novas barragens

### 2.5.1 Geomembranas no paramento de montante

#### 2.5.1.1 Geomembranas cobertas

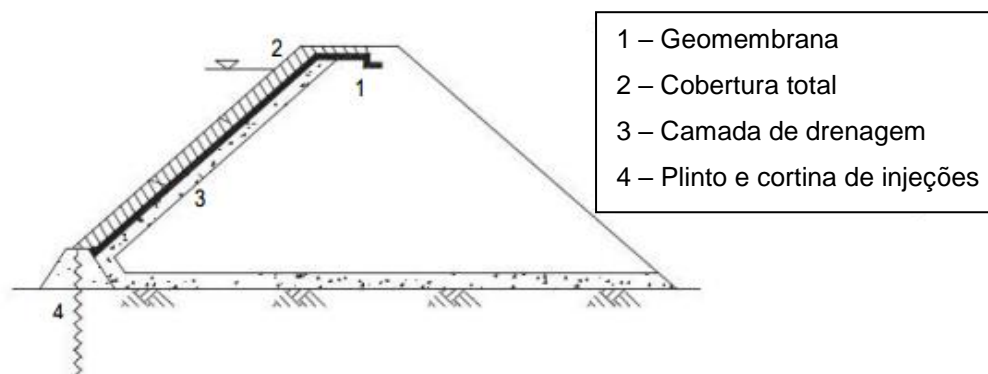
A utilização de cobertura para as geomembranas, apesar de dificultar o acesso às mesmas, no caso de ser necessária reparação ou substituição, confere ao material maior proteção às solicitações que lhe vão sendo impostas durante o seu tempo de serviço, prolongando a sua vida útil. Segundo Cazzuffi *et al.* (2010) existem diversas razões que justificam a utilização de proteção para as geomembranas:

- Proteção contra danos mecânicos causados pelo gelo, pela queda de pedras, por animais, por vandalismo, tráfego, etc.;
- Proteção contra danos causados pelos agentes climáticos (calor, radiação UV, oxigênio) que causam o envelhecimento e degradação da geomembrana;
- Prevenir deslocamentos causados pela ação do vento, da gravidade e das ondas.

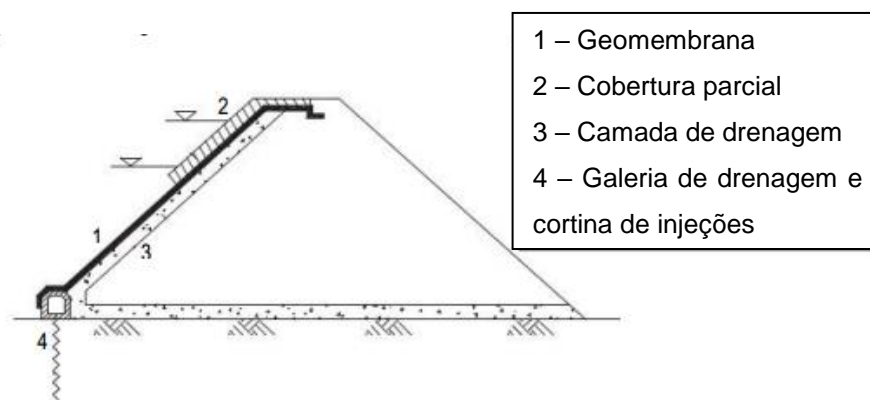
A cobertura de geomembranas, pode ser realizada por vários materiais (ICOLD, 2010):

- **Blocos de betão pré-fabricados:** travados entre si ou articulados. A sua utilização em estruturas hidráulicas e estradas é elevada, no entanto apresenta demasiados movimentos relativos e consequentemente leva ao destacamento, o que levou à diminuição da sua utilização;
- **Lajes de betão:** pré-fabricadas ou executadas “in situ”. A sua utilização apresenta problemas de durabilidade e rigidez, devendo-se usar betão simples ou reforçado com fibras de polipropileno, com juntas que permitam tornar mais flexível a solução e minimizar a fissuração. Tipo de cobertura que pode ser mais leve ou mais pesada;
- **Betão projetado:** camada de cobertura leve, flexível e contínua de betão projetado de 40 a 80 mm de espessura, podendo ser reforçada com um geotêxtil, uma geogrelhas ou fibras de aço;
- **Geocélulas ou geocolchões:** soluções leves com incorporação de betão ou argamassa;
- **Enrocamento ou riprap:** cobertura pesada com boa deformabilidade. Exige a utilização de um geotêxtil como camada de transição. Esta não deve ser utilizada em face muito inclinadas devido a problemas de estabilidade;
- **Camada betuminosa:** camada de granulometria extensa com agregados de espessura suficiente para resistir às solicitações da cobertura. Deve ter-se a sua compatibilidade com o sistema, avaliando a necessidade de uma camada de separação.

Em barragens de aterro, a colocação de geomembranas de forma coberta assume predominância, representando, segundo a ICOLD (2010), cerca de 70% das aplicações. Existe ainda a possibilidade de instalar geomembranas total ou parcialmente cobertas, como é possível observar nas Figuras 2.11 e 2.12, respetivamente.

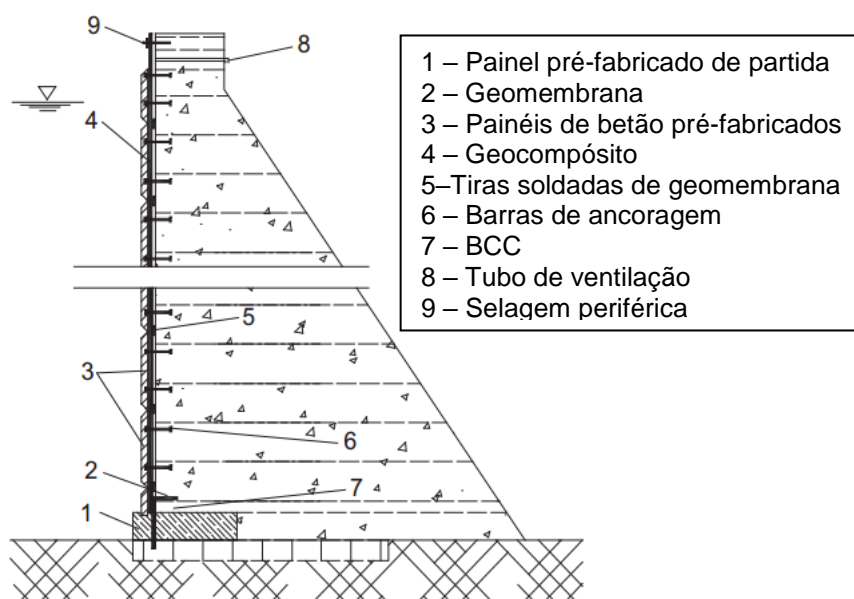


**Figura 2.11 - Geomembrana totalmente coberta (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.12 - Geomembrana parcialmente coberta (Adaptado de ICOLD, 2010).**

Em barragens de BCC, as geomembranas colocadas de forma coberta são unidas a painéis de betão pré-fabricados, que servirão de cofragem permanente na construção da barragem. Os painéis têm a face de betão voltada para a água e a face onde as geomembranas foram unidas voltadas para os “degraus” de BCC. As geomembranas ficam assim instaladas entre os painéis de betão e o corpo da barragem. A ancoragem dos painéis de betão ao corpo da estrutura é realizada com recurso a barras de ancoragem colocadas entre os “degraus” de BCC. O fato de as geomembranas permanecerem completamente embebidas no betão, protege-as permanentemente contra degradações mecânicas, químicas, ambientais, entre outras. Contudo, deve existir um elevado controlo de qualidade na garantia de que as geomembranas não são danificadas durante as operações de colocação do BCC (Cazzuffi *et al.*, 2010). Na Figura 2.13 observa-se um exemplo de um sistema coberto aplicado numa barragem de BCC.

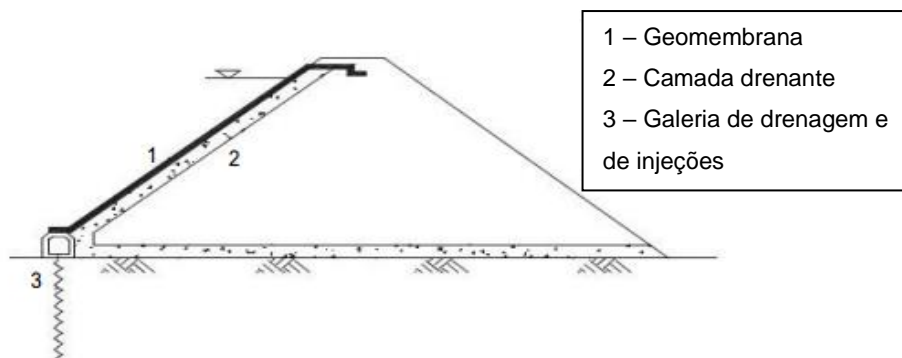


**Figura 2.13 - Exemplo de geomembrana coberta numa barragem de BCC (Adaptado de ICOLD, 2010).**

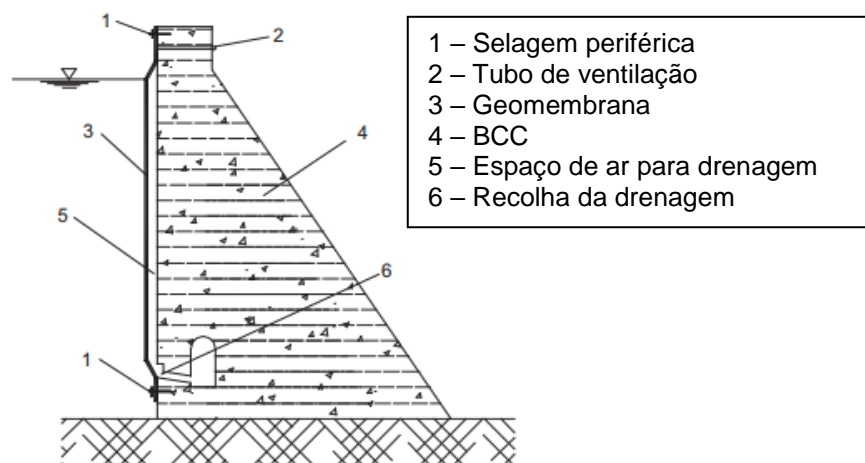
### 2.5.1.2 Geomembranas expostas

As geomembranas utilizadas de forma exposta estão, durante a sua vida útil, bastante mais vulneráveis às solicitações que lhe vão sendo impostas, como por exemplo, a degradação pelos raios UV, do que as geomembranas utilizadas de forma coberta, o que pode reduzir bastante o seu tempo de vida útil. No entanto, o acesso à geomembrana é mais fácil, no caso de a reparação ou substituição ser necessária.

Este tipo de solução, tal como referido anteriormente, pode ser utilizado no paramento de montante de barragens de aterro (Figura 2.14) e de barragens de BCC (Figura 2.15).



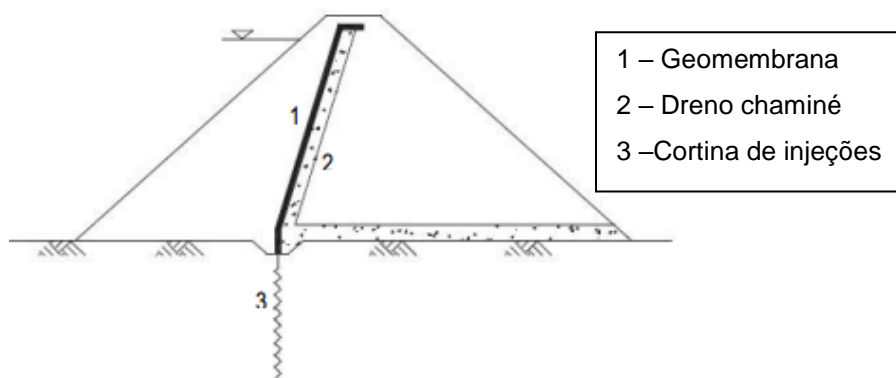
**Figura 2.14- Geomembrana exposta numa barragem de aterro (Adaptado de ICOLD, 2010).**



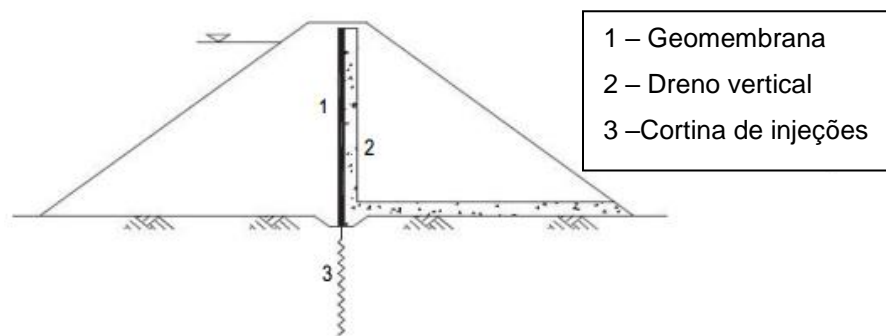
**Figura 2.15 - Geomembrana exposta numa barragem de BCC (Adaptado de ICOLD, 2010).**

### **2.5.2 Geomembranas colocadas internamente no corpo da barragem**

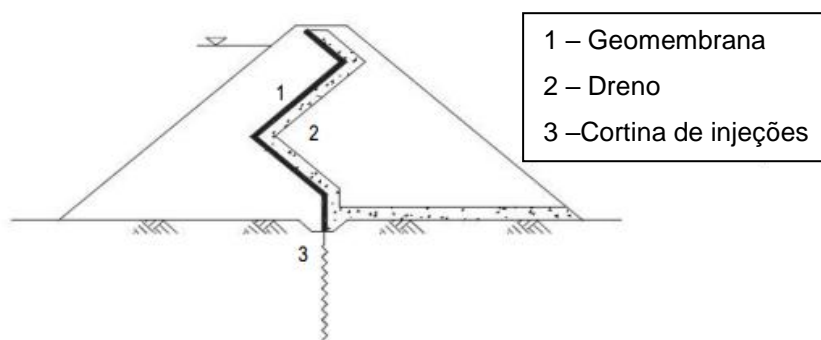
Em barragens de aterro, como referido anteriormente, as geomembranas podem ser colocadas internamente no corpo da estrutura, podendo assumir vários tipos de configurações: inclinadas (Figura 2.16), verticais (Figura 2.17) ou quasi – verticais, em forma de zig zag, de maiores dimensões (Figura 2.18) e menores dimensões (Figura 2.19).



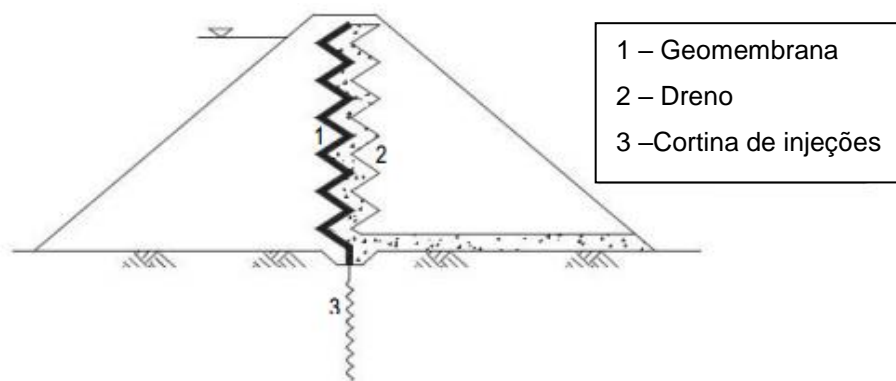
**Figura 2.16 - Geomembrana interna inclinada (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.17 - Geomembrana interna vertical (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.18 - Geomembrana interna quasi-vertical de maiores dimensões (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.19 - Geomembrana interna quasi - vertical com zig zag de menores dimensões (Adaptado de ICOLD, 2010).**



### 2.5.3 Vantagens e inconvenientes das diferentes localizações

Existem vantagens, tanto na colocação das geomembranas no paramento de montante como na sua colocação de forma interna. Estas são abordadas na Tabela 2.5.

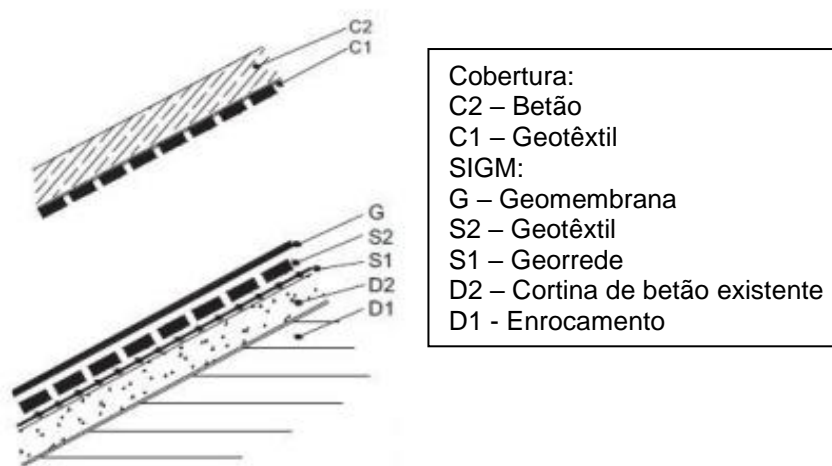
**Tabela 2.5 – Vantagens na aplicação de geomembranas no paramento de montante e de geomembranas internas (Adaptado de ICOLD, 2010).**

| <b><u>Geomembranas no paramento de montante</u></b>  | <b><u>Geomembranas internas</u></b>   |
|--|---|
| A componente vertical da resultante da pressão da água e o peso total da barragem contribuem para a estabilidade da estrutura;                                       | As geomembranas podem ser associadas a uma camada de solo de baixa permeabilidade (argila), formando um revestimento composto que reduz a infiltração no caso de defeitos na geomembrana;   |
| O risco de deslizamento é maior se a geomembrana for instalada de forma vertical ou quasi - vertical;  | As geomembranas encontram-se bem protegidas contra as ações mecânicas externas, a degradação por exposição aos agentes climáticos, aos microorganismos, etc. Isto, assumindo que a colocação dos materiais adjacentes foi executada com cuidado, sem danificar a geomembrana; |
| A construção de uma barragem com uma geomembrana vertical ou quasi-vertical é mais difícil que a construção de uma barragem com uma geomembrana na face de montante; | O levantamento das geomembranas pela ação do vento é, obviamente, prevenido;  |
| Os tempos de construção, uma vez que a instalação da geomembrana é apenas ligeiramente influenciada pelas condições climáticas, podem ser mais reduzidos;            | A quantidade de geomembrana colocada é menor, nos casos das configurações inclinadas e verticais;   |
| Sendo um sistema superficial, a sua eventual reparação ou substituição é mais prática que a de um sistema interno.   | As ancoragens são dispensadas, pois as geomembranas são mantidas sempre no lugar;   |
|  | A configuração em forma de zig zag é muito pouco sensível a assentamentos.  |

## 2.6 Geomembranas na reabilitação de barragens

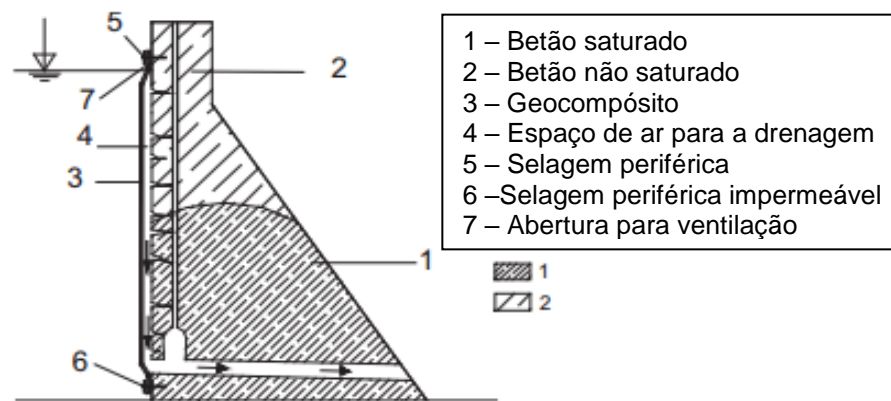
As ações de reabilitação em barragens, com recurso a geomembranas constituem, segundo a ICOLD (2010), cerca de 40% das intervenções em barragens. Estas procedem-se em todos os tipos de barragens, podendo, de acordo com a Tabela 2.4, passar pela colocação de geomembranas em estruturas inicialmente construídas sem recurso a este tipo de material, como é o caso das barragens de betão, ou pela reparação das soluções inicialmente utilizadas.

Em barragens de aterro, as geomembranas têm sido muito utilizadas na reabilitação de barragens de enrocamento com cortina de betão ou betão betuminoso a montante. As intervenções podem passar pela aplicação de um sistema em determinadas zonas da barragem ou pela sua reparação. Quando a intervenção consiste na aplicação de uma geomembrana, esta pode ser aplicada em todo o paramento de montante ou apenas nos locais mais degradados, no revestimento da barragem ou ainda na fundação como cortina impermeabilizante. Por outro lado, se a intervenção passa pela reparação da própria geomembrana, a solução pode passar pela colocação de uma nova barreira sobre a existente (necessidade de uma camada com grande capacidade de drenagem- georrede) ou pela sua total substituição (Figueira, 2014). Na Figura 2.20, observa-se um exemplo de um sistema de impermeabilização utilizado na reabilitação de uma barragem de enrocamento com cortina de betão a montante.



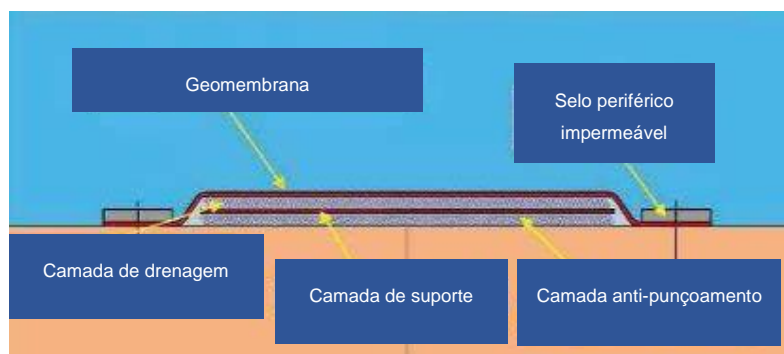
**Figura 2.20 - Geomembrana na reabilitação de uma barragem de enrocamento com cortina de betão a montante (Adaptado de ICOLD, 2010).**

Em barragens de betão, as intervenções de reabilitação, com recurso a sistemas de impermeabilização, assumem extrema importância, por se tratarem das principais intervenções, e únicas referidas neste trabalho, realizadas neste tipo de estruturas. Estas, como mostra a Tabela 2.4, consistem na colocação de geomembranas, deixadas expostas, em todo o paramento de montante, de forma a devolver a impermeabilidade perdida ao longo do tempo. A aplicação das geomembranas, pressupõe a execução de hidrodecapagem para remoção de todo o material degradado. Na Figura 2.21, observa-se um exemplo da constituição de um sistema exposto utilizado para reabilitação de barragens de betão.



**Figura 2.21 - Exemplo de uma geomembrana exposta para reabilitação de barragens (Adaptado de ICOLD, 2010).**

Em barragens de BCC, o recurso a sistemas de impermeabilização com geomembranas, em ações de reabilitação passa, essencialmente, pela reparação de fissuras utilizando sistemas *waterstop*, de acordo com a Tabela 2.4. Estas intervenções consistem na colocação de faixas de geomembrana sobre as fissuras. As faixas, de forma a impedir que entrem na fissura, são suportadas por uma estrutura, composta por diferentes camadas, de acordo com a pressão da água e com as solicitações previstas. A Figura 2.22, mostra a constituição de um *waterstop*.



**Figura 2.22 - Sistema *waterstop* (Adaptado de Cazzuffi *et al.*, 2010).**

Devido ao fato da construção de barragens em BCC ser relativamente recente, a experiência na reabilitação deste tipo de estruturas é ainda bastante reduzida, datando a primeira intervenção do gênero apenas do ano 2000 (ICOLD, 2010).

## 2.7 Ancoragens

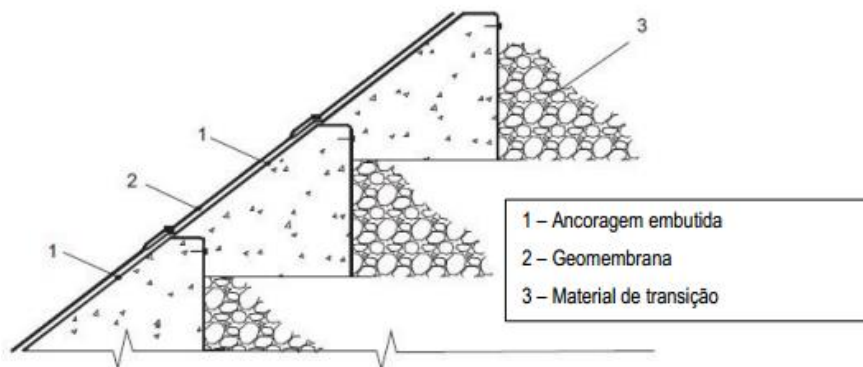
Conforme abordado anteriormente, as geomembranas são utilizadas no paramento de montante de uma barragem, de forma a impermeabilizá-lo. Para tal, existe a necessidade de garantir que estas se mantêm no sítio correto, impedindo o seu deslocamento devido à ação do vento, das ondas ou da gravidade, especialmente no caso de utilização de forma exposta. Dessa forma, são utilizados sistemas de ancoragem de modo a fixá-las ao paramento, bem como selantes para garantir, como o próprio nome indica, a selagem das ligações e juntas. Os sistemas de ancoragem podem variar consoante o tipo de barragem, conforme abordado de seguida.

Em barragens de aterro, de todas as ações, anteriormente enumeradas, a ação do vento sobre a geomembrana (elevação da geomembrana) é aquela que envolve maior risco. De acordo com Giroud *et al.* (1995), a tensão gerada pelo vento nas geomembranas é proporcional ao quadrado da velocidade do vento e à distância entre as ancoragens, por isso, se a velocidade do vento e a altura da barragem estiverem limitados é possível realizar ancoragens apenas na periferia ao longo da face de montante. Se as condições anteriores não se verificarem, como é prática mais comum, é necessário projetar sistemas de ancoragens ao longo de toda a face de montante, podendo estes, de acordo com a ICOLD (2010), ser:

- **Mecânicos:**

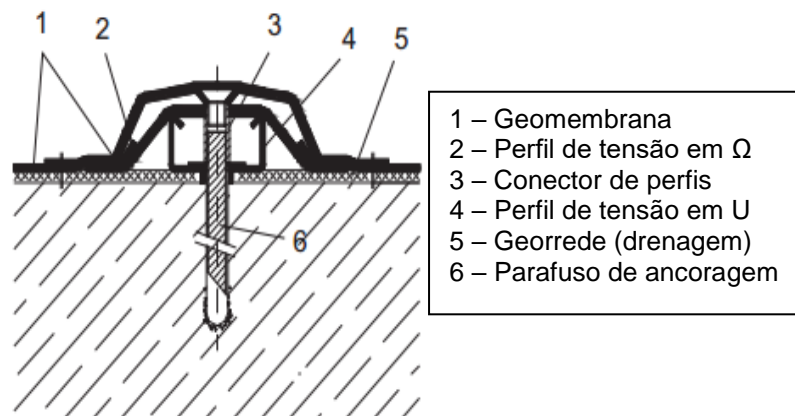
- Rede de pontos ao longo da superfície, com um espaçamento dependente das solicitações (normalmente muito pequeno e menor na parte superior que na parte inferior, devido à intensidade da ação do vento). As ancoragens de aço em pontos específicos têm que ser fixadas na camada de suporte, o que implica uma camada de suporte com resistência suficiente para suportar a forças das ancoragens;
- Linhas paralelas com o coroamento (recomendado). As ancoragens em linha podem ser feitas com o embutimento da geomembrana no corpo da barragem, sendo posteriormente soldadas (Figura 2.23). Existem outras opções de ancoragens em linha feitas de geomembrana presas a faixas de aço inoxidável em valas verticais, posteriormente soldadas com o sistema final.

- **Por colagem:** em reabilitação de barragens de aterro com cortina de betão a montante é possível colar a geomembrana à face de betão através de resina epoxídica. A colagem em toda a superfície não é recomendada por motivos de drenagem. Este tipo de ancoragem não é comum nem recomendada devido à sua questionável durabilidade e ao difícil controlo de qualidade.



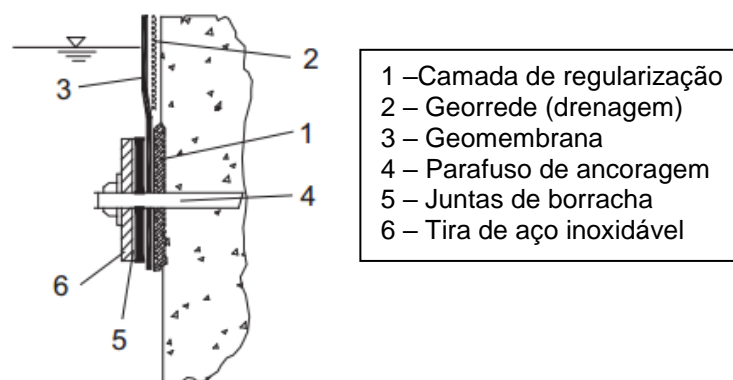
**Figura 2.23 - Ancoragem superficial em linha (Adaptado de ICOLD, 2010).**

Em barragens de betão, a ancoragem utilizada é sempre mecânica, realizada através de um sistema de tensão, constituída por dois perfis verticais de aço inoxidável: um primeiro, interno, em forma de U, fixado na face de montante da barragem, e um segundo, externo, em forma de ómega, instalado sobre a geomembrana. A geometria dos dois perfis é tal que, quando estes estão corretamente ligados, exercem na geomembrana uma pré-tensão que a segura contra o paramento de montante, de forma tensionada, impedindo assim a formação de dobras ou folgas. A tensão pré exercida contribui muito para a segurança e durabilidade dos sistemas, uma vez que, ao impedir a formação de dobras ou folgas se impede a formação de locais onde ocorreriam mais facilmente concentração de tensões que, posteriormente, levariam ao seu mais rápido envelhecimento. O espaçamento entre os perfis verticais é ditado pelas condições de carga e a largura dos rolos das geomembranas (espaçamento típico é de 1,80 m, 3,7 m ou 5,7 m). Para além da ancoragem, os perfis verticais, criam canais que contribuem para o aumento da capacidade de drenagem do sistema. Na Figura 2.24, observa-se o sistema de ancoragem utilizado na reabilitação de barragens de betão.



**Figura 2.24 - Ancoragem mecânica usada em reabilitação de barragens de betão (Adaptado de ICOLD, 2010).**

A ancoragem apenas fica completa com a aplicação de selos periféricos que impedem a infiltração de água por trás das geomembranas. Estes são realizados por compressão das geomembranas sobre o betão através de tiras em aço inoxidável com uniões apropriadas. Os selos foram concebidos para serem estanques contra a pressão da água, pelo que podem ser aplicados de forma submersível, como se pode observar na Figura 2.25.



**Figura 2.25 - Selo periférico aplicado de forma submersível (Adaptado de ICOLD, 2010).**

Em barragens de BCC, a fixação é feita, tal como em barragens de betão, através de um sistema de ancoragem mecânico, completado pela selagem periférica. Contudo, em barragens de BCC, o sistema de tensão pode ser aplicado de duas formas possíveis: o perfil em U pode ser embebido no betão durante a construção da barragem ou pode ser instalado após a sua construção. Ambas são equivalentes tecnicamente, sendo a opção externa menos exigente em termos de controlo de qualidade durante os trabalhos de aplicação do betão.

## 2.8 Soldaduras

As soldaduras assumem-se como um dos aspetos de instalação mais importantes, uma vez que a sua qualidade de execução determina em grande parte a qualidade de um sistema de impermeabilização. Uma execução deficiente das soldaduras pode originar a perda de estanquidade e integridade de um sistema dado que estas constituem zonas vulneráveis durante a sua execução, o que as torna em pontos privilegiados para a ocorrência de fugas.

As soldaduras consistem no processo de união entre painéis de geomembranas. Estas pressupõem a sobreposição entre os painéis numa largura que depende do método de soldadura utilizado, bem como do tipo de geomembrana. Por exemplo, para geomembranas de PVC, a sobreposição deve ser feita numa largura de 0,1 a 0,3 m.

Existem vários métodos de soldadura, sendo que nem todos são aplicáveis a todas as geomembranas. A Tabela 2.6 apresenta os métodos existentes e a sua aplicabilidade para diferentes geomembranas.

**Tabela 2.6 – Aplicabilidade dos métodos de soldadura para diferentes geomembranas (ICOLD, 2010).**

| <b>Método de soldadura</b> | <b>Geomembrana</b> |              |             |           |             |
|----------------------------|--------------------|--------------|-------------|-----------|-------------|
|                            | <b>PVC</b>         | <b>PELBD</b> | <b>PEAD</b> | <b>PP</b> | <b>CSPE</b> |
| <b>Termofusão</b>          | a.                 | a.           | a.          | a.        | a.          |
| <b>Extrusão</b>            | n.a.               | a.           | a.          | a.        | n.a.        |
| <b>Colagem</b>             | a.                 | n.a.         | n.a.        | n.a.      | a.          |
| <b>Química</b>             | a.                 | n.a.         | n.a.        | n.a.      | a.          |

[a. – aplicável] [n.a. – não aplicável]

A soldadura por termofusão consiste na união das geomembranas superior e inferior por aquecimento, através de uma cunha metálica quente ou por insuflação de ar quente, com o auxílio de uma pressão mecânica de rolos compressores sobre as geomembranas aquecidas. As soldaduras podem ser simples ou duplas, consoante se tenham um ou dois rolos compressores ou uma ou duas cunhas quentes. As duplas têm a vantagem de permitir a realização de ensaios para verificação da sua continuidade (estanquidade), através da injeção de ar sob pressão no canal existente entre as duas zonas de soldadura.

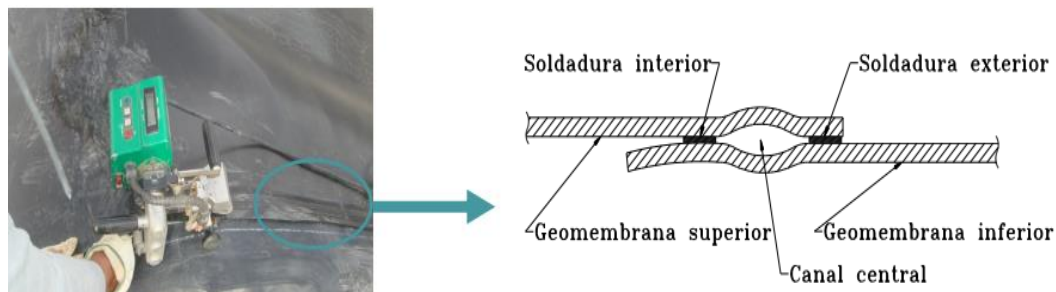
A soldadura por extrusão consiste na deposição de material, obtido através da extrusão de um cordão de mesmo polímero da geomembrana, a temperatura elevada, na borda do painel da geomembrana superior. Esta técnica não é aplicável a geomembranas de PVC.

A soldadura por colagem consiste na união dos painéis mediante a incorporação de um adesivo na zona de sobreposição dos mesmos.

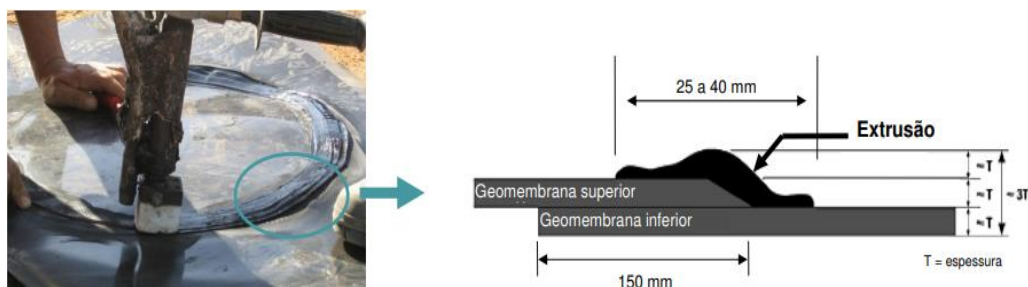
A soldadura química consiste na união dos painéis mediante “ataque” químico das superfícies, provocado por um solvente volátil que leva à fusão das geomembranas superior e inferior, com o auxílio de uma pressão mecânica de um rolo. Estas soldaduras implicam que a camada subjacente esteja perfeitamente plana, só podendo realizar-se se a humidade ambiente for inferior a 70% e a temperatura da geomembrana superior a 15°C.



Nas Figuras 2.26 e 2.27, observam-se as técnicas de soldadura mais comuns: por termofusão e por extrusão, respectivamente.



**Figura 2.26 - Soldadura por termofusão (Adaptado de Barroso & Lopes, 2008).**



**Figura 2.27 - Soldadura por extrusão (Adaptado de Barroso & Lopes, 2008).**

A qualidade de execução das soldaduras deve sempre ser verificada em termos de continuidade/estanqueidade e de resistência mecânica.

### 2.8.1 Continuidade/estanqueidade das soldaduras

A verificação da continuidade é realizada através de ensaios de campo, dependendo do tipo de soldadura e de geomembrana. Na Tabela 2.7, observam-se os tipos de ensaios de continuidade a realizar para geomembranas de PVC e PEAD, bem como as respectivas normas a seguir.

**Tabela 2.7 - Ensaio de continuidade de soldaduras e respectivas normas para geomembranas de PVC e PEAD.**

| Tipo de soldadura |         | Ensaio                              | Geomembrana |             |
|-------------------|---------|-------------------------------------|-------------|-------------|
|                   |         |                                     | PVC         | PEAD        |
| Termofusão        | Simples | Vácuo<br>“vacuum chambers”          | -           | ASTM D 5641 |
|                   | Dupla   | Pressão de ar<br>“air test channel” | ASTM D 7177 | ASTM D 5820 |
| Extrusão          |         | Fio de cobre<br>“spark test”        | -           | ASTM D 6365 |
| Colagem; Química  |         | Jato de ar<br>“air lance test”      | ASTM D 4437 | -           |

O ensaio de pressão de ar é o mais utilizado e, por isso, o único detalhado neste trabalho. Este é o ensaio de continuidade efetuado em soldaduras duplas por termofusão para todos os tipos de geomembranas.

A realização do ensaio consiste na pressurização do canal central da soldadura, após selagem das duas extremidades da junta, mediante a injeção de ar a uma determinada pressão. A pressão aplicada depende da espessura da geomembrana. O objetivo do ensaio é verificar se o valor da pressão permanece estável, durante um determinado intervalo de tempo, ou se, pelo contrário diminui, evidenciando a existência de uma fuga. A Figura 2.28 representa o ensaio.



**Figura 2.28 - Ensaio de continuidade de pressão de ar (Adaptado de Barroso & Lopes, 2008).**

## 2.8.2 Resistência mecânica das soldaduras

A resistência mecânica das soldaduras é avaliada através de ensaios de campo ou em laboratório de resistência ao arranque (*peel test*) e ao corte (*shear test*). O ensaio de arranque permite avaliar a qualidade da ligação (Peggs & Little, 1985), enquanto o ensaio de corte permite avaliar de que forma o processo de soldadura afeta a resistência da geomembrana adjacente à zona soldada (Peggs, 1990). O princípio dos ensaios consiste na tração, a uma velocidade preconizada, de cada amostra de geomembrana, conforme exemplificado na Figura 2.29, respetivamente para o ensaio de arranque e corte.

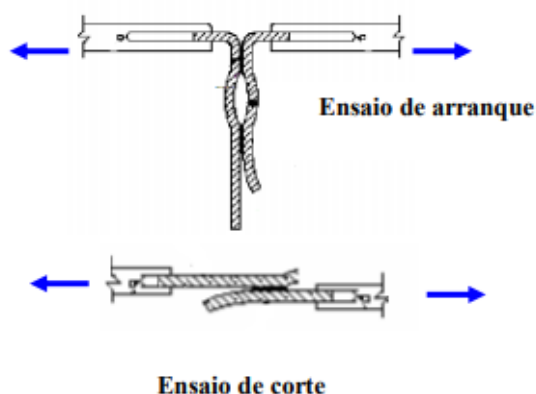


Figura 2.29 - Ensaios de resistência mecânica ao arranque e ao corte (adaptado de Barroso & Lopes, 2008).

Os ensaios de resistência mecânica das soldaduras devem realizar-se segundo normas específicas consoante o método de soldadura utilizado seja de natureza química ou térmica. Para soldaduras de natureza química, os ensaios de resistência devem ser realizados de acordo como a norma ASTM D 6214, enquanto para as de natureza térmica a norma a utilizar deve ser a ASTM D 6392.

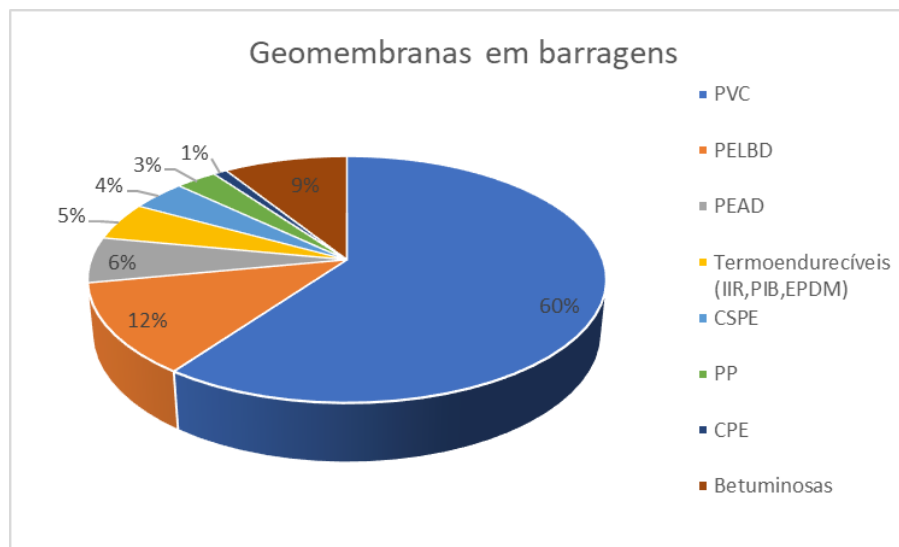
No caso de soldaduras em geomembranas de PVC com espessuras compreendidas entre os 0,25 e os 1,52 mm, a norma ASTM D 7408 poderá ser também utilizada, independentemente de a natureza das soldaduras ser térmica, química ou realizada por colagem. Contudo o procedimento de ensaio para soldaduras de origem térmica não difere do utilizado na norma anteriormente mencionada (ASTM D 6392).

A avaliação da resistência mecânica das soldaduras será objeto de estudo neste trabalho, nomeadamente, através da realização de um trabalho experimental, apresentado no capítulo 4

deste trabalho que estuda o impacto da temperatura na força de arranque de soldaduras por termofusão (ar quente) em geomembranas de PVC.

## 2.9 Geomembranas mais usadas em barragens

Existe uma grande variedade de geomembranas utilizadas na impermeabilização de barragens. A Figura 2.30, mostra os tipos de geomembranas utilizados e qual a sua expressão em termos de quantidade.

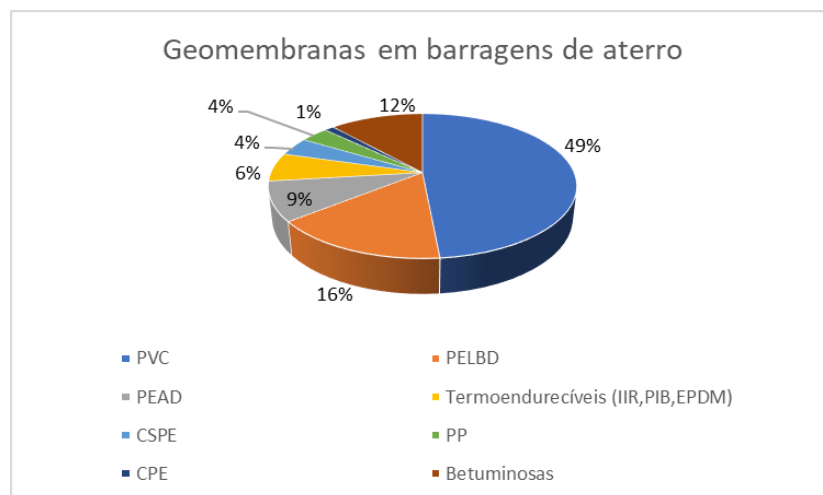


**Figura 2.30 - Geomembranas em barragens (Adaptado de ICOLD, 2010).**

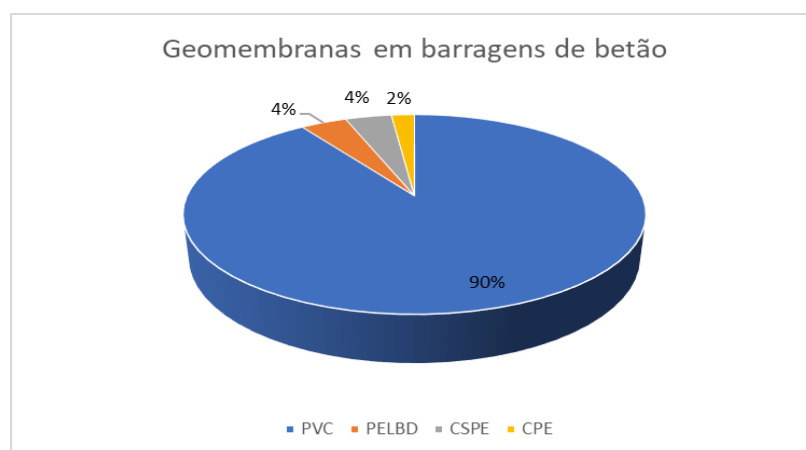
Verifica-se que as geomembranas mais utilizadas em barragens são as de PVC, constituindo cerca de 60% da totalidade das aplicações.

A utilização de outros tipos de geomembranas em barragens para além das poliméricas, como é o caso das geomembranas betuminosas tem vindo a diminuir com o desenvolvimento na área dos geossintéticos e a experiência adquirida neste tipo de estruturas, representando, atualmente, apenas uma pequena percentagem do total utilizado (Figura 2.30).

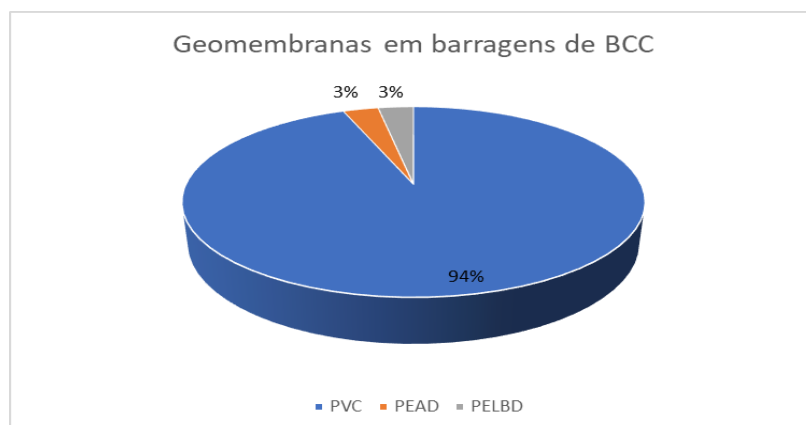
O tipo de geomembrana utilizado é também influenciado pelo tipo de barragem, tal como ilustrado nas Figuras 2.31, 2.32 e 2.33, para barragens de aterro, de betão ou de BCC, respetivamente. No entanto, as geomembranas de PVC são sempre as mais utilizadas.



**Figura 2.31- Geomembranas em barragens de aterro (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.32 - Geomembranas em barragens de betão (Adaptado de ICOLD, 2010).**



**Figura 2.33 - Geomembranas em barragens de BCC (Adaptado de ICOLD, 2010).**

A maior utilização de geomembranas de PVC em barragens, de acordo com Cazzuffi *et al.* (2010), prende-se com a elevada flexibilidade deste material. A elevada flexibilidade confere ao material uma maior adaptabilidade ao corpo da estrutura, diminuindo os riscos de danos causados na geomembrana tais como rasgos ou perfurações. Segundo Neves *et al.*, (2015), contribuem também para a elevada utilização do PVC, a elevada extensão na rotura, suportando bem as ações de punçoamento, e os deslocamentos que possam ocorrer nas barragens. Outro aspeto importante reside na maior trabalhabilidade oferecida pelas geomembranas de PVC em comparação com outros materiais como o PE ou o PP, o que proporciona maior facilidade na execução das soldaduras, as quais são consideradas como um dos aspetos de instalação mais importantes na impermeabilização de barragens com recurso a geomembranas. O custo mais reduzido deste tipo de geomembranas é também umas das razões para a sua elevada utilização.

De um modo global, as geomembranas de PVC são das mais utilizadas como barreira em barragens. Contudo, outros tipo de geomembranas podem ser usadas, tais como as de PEAD, muito estudadas devido à sua elevada utilização em aterros sanitários, onde são sujeitas a condições bastante exigentes. Na Tabela 2.8 apresenta-se as vantagens e inconvenientes associados a estes dois tipos de geomembranas.

**Tabela 2.8 - Vantagens e desvantagens dos principais tipos de geomembranas (Adaptado de Vertematti, J. C., 2004).**

| <b>Tipo de geomembrana</b>                            | <b>Vantagens</b>  | <b>Desvantagens</b>   |
|---|---|---|
| <b>PVC</b><br><b>(policloreto de vinilo)</b>          | Boa trabalhabilidade (flexível);<br>Facilidade de soldadura;<br>Bom atrito mesmo com superfície lisa;<br>Boa resistência mecânica | Baixa resistência aos raios UV e intempéries;<br>Fraco desempenho a temperaturas altas e baixas;<br>Baixa resistência química |
| <b>PEAD</b><br><b>(Polietileno de alta densidade)</b> | Boa resistência contra agentes químicos;<br>Boa resistência mecânica;<br>Bom desempenho a baixas temperaturas                     | Baixo atrito com superfície lisa;<br>Difícil adaptabilidade;<br>Baixa resistência ao punçoamento;<br>Stress cracking          |

## **2.10 Considerações finais**

Neste capítulo apresentaram-se os vários tipos de geomembranas, de acordo com a matéria prima utilizada no seu fabrico, com destaque para as poliméricas sobre as quais se apresentam os diferentes tipos de polímeros utilizados na sua produção, bem como alguns aditivos que podem ser utilizados.

Apresentaram-se, neste capítulo, as principais propriedades que normalmente são tidas em conta na aplicação de geomembranas em barragens.

As diferentes localizações que as geomembranas podem assumir no corpo de uma barragem, bem como a sua utilização quer na construção de novas barragens, quer em ações de reabilitação de estruturas existentes foram igualmente abordados neste capítulo.

Aspetos bastante importantes para o bom desempenho das geomembranas instaladas em barragens foram apresentados, nomeadamente as ancoragens e as soldaduras.

As geomembranas de PVC são, em larga maioria, as mais utilizadas como barreira em barragens. A sua elevada flexibilidade permite-lhe apresentar uma maior adaptabilidade ao corpo da estrutura e assim diminuir o risco de danos causados por ações de punçoamento ou deslocamentos da própria estrutura.





## **Principais desenvolvimentos sobre a aplicação de geomembranas em barragens**

### **3.1 Introdução**

As geomembranas são utilizadas em barragens desde a década de 60. A aplicação de geomembranas em barragens trouxe novos desafios à engenharia, tendo sido realizados vários estudos com o objetivo de identificar os principais aspetos que podem influenciar o desempenho das geomembranas neste tipo de obras.

Zornberg e Weber (2003) sublinharam a necessidade de investigação no domínio das barragens, identificando como principais tópicos a estudar os seguintes: durabilidade, fugas, dimensionamento, requisitos em termos de instalação, adequada seleção do material, controlo de qualidade de construção e garantia de qualidade de construção (CQC/CQA).

Neste capítulo, apresentam-se os principais avanços alcançados nos principais tópicos, identificados por Zorneberg & Weber (2003), para a aplicação de geomembranas em barragens, nomeadamente: a durabilidade, as fugas e os requisitos de instalação, com destaque para as soldaduras, as dobras e as condições da superfície de apoio.

### **3.2 Durabilidade**

A durabilidade das geomembranas aplicadas nos diferentes sistemas de impermeabilização constitui-se como uma das questões mais relevantes para a avaliação do desempenho destes materiais.

De um modo geral, a durabilidade de uma geomembrana depende da sua resistência às solicitações a que vai estando sujeita em condições de serviço. Solicitações como pressões hidrostáticas, temperaturas extremas, radiação UV, oxidação, queda de materiais, ação do vento e das ondas, vandalismo, fauna e flora, etc., são algumas das que mais contribuem para a sua deterioração, tal como referido por Cazzuffi *et al.* (2010). Os autores sublinham que a durabilidade depende, também, da composição e do processo de fabrico da geomembrana, pelo que é muito importante uma seleção criteriosa sobre o tipo de geomembrana a aplicar em cada obra.

Tal como referido por Rowe *et al.* (2009) e Cazzuffi *et al.* (2010), a forma ideal de avaliar a durabilidade de uma geomembrana é com base em resultados obtidos sobre amostras envelhecidas naturalmente (recolhidas *in situ*), contudo a obtenção de resultados, neste caso, pode ser muito morosa. Dessa forma, os estudos sobre durabilidade têm também recaído sobre amostras envelhecidas aceleradamente em laboratório.

Em qualquer dos casos, os resultados têm sido usados para estimar o tempo de vida útil de uma geomembrana. O tempo de vida útil (ou meia vida, como é designado na indústria dos polímeros) corresponde ao tempo necessário para que ocorra um decréscimo de 50 % no valor das propriedades, relativamente a um determinado valor alvo. Para Hsuan & Koerner (1998), o valor alvo corresponde ao valor inicial da propriedade, enquanto, para Rowe *et al.* (2009), corresponde ao seu valor especificado no projeto, o qual pode resultar do dimensionamento com base em critérios de desempenho ou ser definido por regulamentos técnicos, como é o caso do GRI-GM 13, para geomembranas de PEAD.

Para geomembranas aplicadas em barragens, segundo Cazzuffi *et al.* (2010), a maneira mais prática de avaliar a durabilidade de uma geomembrana, ou seja, verificar se esta, a longo prazo, irá resistir às solicitações previstas em condições de serviço é recolher amostras (*in situ*) do mesmo tipo de geomembrana que já estiveram instaladas, num ambiente e tipo de projeto semelhantes, por um período de tempo o maior possível, e proceder à realização de ensaios às propriedades do material. Dessa forma é possível determinar se, no momento dos ensaios, os resultados obtidos estão dentro de limites considerados como aceitáveis e ainda determinar a restante vida útil esperada para a geomembrana através da extrapolação dos mesmos.

Este tipo de metodologia foi adotado em Itália, por Cazzuffi (1987 e 1996), onde o autor utilizou os dados obtidos em várias barragens reabilitadas com geocompósitos de PVC (geomembrana de PVC + geotêxtil). A aplicação mais antiga de geomembranas expostas de PVC em barragens remonta à década de 70, sendo que desde essa altura muitas barragens foram reabilitadas com recurso a este tipo de material, permitindo a comparação entre os resultados.

Muitas dessas barragens reabilitadas estavam localizadas a elevadas altitudes (superiores a 2000m), onde a radiação UV é intensa e as condições climáticas bastante severas, condições também verificadas nas várias barragens cujos dados foram utilizados por Cazzuffi (1987 e 1996).

A partir dos dados obtidos por Cazzuffi (1987 e 1996), Hsuan *et al.* (2008) concluíram que a vida útil de geomembranas de PVC num ambiente tão severo, seria superior a 50 anos.

Cazzuffi *et al.* (2010) referem que a durabilidade das geomembranas instaladas atualmente, devido à qualidade superior dos materiais instalados, pode ser superior aos 50 anos previstos em 2008. Os autores sugerem que a metodologia descrita anteriormente, para geomembranas de PVC, deve ser utilizada para outros tipos de geomembranas, de forma a prever a sua durabilidade e se esta é adequada para o uso em barragens.

A avaliação das propriedades das geomembranas, como já referido, pode dar indicação sobre o seu desempenho ao longo do tempo. Através dos resultados obtidos em ensaios realizados sobre amostras removidas de geomembranas em condições de serviço, é possível analisar as propriedades que podem ser condicionantes para o desempenho da geomembrana durante a sua vida útil. Esse trabalho foi efetuado por Cazzuffi (2014), ao realizar um conjunto de ensaios (Tabela 3.1) sobre amostras recolhidas nas mesmas barragens onde tinham sido recolhidas amostras em 1987 e 1996, permitindo uma análise comparativa por um período de 20 anos.

Segundo o autor, antes da realização dos ensaios, procedeu-se à separação do geocompósito, ensaiando apenas a geomembrana de PVC, de forma a obter resultados sobre o material na sua condição homogénea.

Cazzuffi (2014), verificou a ocorrência de uma diminuição do teor de plastificantes e da espessura nominal da geomembrana.

O ensaio de flexibilidade a baixas temperaturas, demonstrou que, com o passar do tempo, o material deixou de suportar temperaturas mais baixas sem evidenciar danos, existindo apenas ausência dos mesmos para temperaturas cada vez mais elevadas.

A estabilidade dimensional aumentou longitudinalmente mas diminuiu transversalmente, uma vez que depende das condições de aplicação do sistema de impermeabilização.

A resistência à tração aumentou e a correspondente extensão diminuiu, indicando que a geomembrana ficou mais rígida ao longo do tempo.

**Tabela 3.1 - Ensaio laboratoriais e respectivas normas (Adaptado de Cazzuffi, 2014).**

| <b><u>Ensaio</u></b>                       | <b><u>Norma</u></b> |
|--|---------------------|
| <b>Extração de plastificantes</b>          | ISO 6427            |
| <b>Espessura nominal</b>                   | EN 1849-2           |
| <b>Massa volúmica</b>                      | EN ISO 1183         |
| <b>Dureza</b>                              | EN ISO 868          |
| <b>Flexibilidade a baixas temperaturas</b> | EN 1109             |
| <b>Estabilidade dimensional</b>            | EN 1107-2           |
| <b>Propriedades de tração</b>              | EN 12311-2          |
| <b>Transmissão de vapor de água</b>        | EN 1931             |

Cazzuffi (2014) referiu que a propriedade que apresentou um comportamento mais estável, ao longo do tempo, foi o teor de plastificantes, podendo este ser um bom indicador sobre o tempo de vida útil previsto para uma geomembrana de PVC.

O autor referiu ainda que o decréscimo nas propriedades mecânicas (elasticidade, flexibilidade, entre outras.) pode, também, fornecer indicações sobre a durabilidade. A monitorização constante e a recolha frequente de amostras expostas *in situ* é importante para identificar sinais de deterioração.

Outros trabalhos sobre a evolução das propriedades das geomembranas ao longo do tempo têm sido publicados, nomeadamente alguns trabalhos sobre a evolução das propriedades das geomembranas instaladas em reservatórios (Blanco & Aguiar (1993), Aguiar & Blanco,(1995), Blanco & Zaragoza (2003), Blanco *et al.* (2002, 2008, 2010, 2012, 2013, 2016 e 2018), Noval (2015), entre outros).

Dado que, neste tipo de obras, as geomembranas estão sujeitas a solicitações semelhantes às observadas em barragens, apresentam-se seguidamente os desenvolvimentos mais recentes, nomeadamente os relatados por Blanco *et al.* (2018).

Os autores analisaram a durabilidade de geomembranas de PVC reforçadas instaladas em seis reservatórios ao longo de um período variável entre 18 e 31 anos. Para tal, avaliaram a

evolução de algumas propriedades, tais como: o teor de plastificantes, a flexibilidade a baixas temperaturas, a resistência à tração, a resistência ao punçoamento, a resistência das soldaduras e o resultado de análises microscópicas às superfícies das geomembranas.

Os resultados obtidos revelaram que, ao longo do tempo, as propriedades mecânicas dos materiais superavam os valores requeridos pelo regulamento técnico produzido pelo *Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural e Marino* (MARM 2010).

A resistência à tração continuava elevada com o passar do tempo, apresentando valores duas vezes superiores aos mínimos requeridos pelo MARM (2010). Esse fato é atribuído, pelos autores, à presença do geotêxtil de reforço. No entanto, foram registradas perdas de plastificante superiores a 70% e sinais de deterioração da superfície exposta aos UV, como fissuras e quebras.

As análises microscópicas revelaram uma boa condição da superfície coberta em oposição ao elevado estado de deterioração da superfície exposta.

Os autores concluíram que a elevada durabilidade das geomembranas instaladas nos reservatórios analisados se deve ao bom comportamento do reforço sintético presente nas geomembranas.

Blanco *et al.* (2018) referiram que a durabilidade das geomembranas de PVC pode ser avaliada com base em propriedades chave, nomeadamente o teor de plastificantes e a flexibilidade a baixas temperaturas. De acordo com os autores, a evolução destas propriedades, ao longo do tempo, pode ser um bom indicador sobre o desempenho do material durante a sua vida útil. Esta proposta corrobora a anteriormente apresentada por Cazzuffi (2014), relativamente ao teor de plastificantes.

A aplicação do conceito de avaliação da vida útil propostos por Hsuan & Koerner (1998) e Rowe *et al.* (2009) em propriedades chave, como é o caso do teor de plastificantes, podem ajudar a prever qual a durabilidade de uma geomembrana de PVC.

Blanco *et al.* (2018) comentaram a adequabilidade dos conceitos de vida útil referidos por Hsuan & Koerner (1998) e por Rowe *et al.* (2009), afirmando que ambos são bastante restritivos, uma vez que a experiência em campo tem mostrado diversos casos em que os materiais já ultrapassaram os limites referidos continuando, no entanto, a cumprir a sua principal função, a de barreira. Os autores alertaram que segundo a proposta de Rowe *et al.* (2009) o teor de plastificantes não pode ser considerado uma propriedade chave pois qualquer fabricante pode transformar PVC rígido em flexível utilizando diferentes métodos, entre eles a plastificação interna. Dessa forma, apenas consideraram o teor de plastificantes uma

propriedade chave tendo em conta a proposta de Hsuan & Koerner (1998) para o seu estudo sobre durabilidade de geomembranas de PVC, no qual constataram que várias geomembranas apresentavam decréscimos do teor de plastificantes bastante superiores a 50% em relação ao seu valor inicial, continuando, no entanto, as mesmas a desempenhar a sua principal função de forma satisfatória.

Blanco *et al.* (2018), alertaram para a necessidade de maior discussão sobre a questão da avaliação da durabilidade de geomembranas de PVC com base em decréscimos dos valores de propriedades consideradas como chave, nomeadamente o teor de plastificantes.

Embora as geomembranas de PVC sejam as mais utilizadas em barragens, tem sido para geomembranas de PEAD que as questões de durabilidade têm sido mais estudadas.

Dada a importância que tais desenvolvimentos poderão ter para o conhecimento do desempenho do material sob a influência de determinadas condições, nomeadamente da forma de exposição do material (coberta ou exposta), da temperatura, da radiação UV, ou da oxidação, entre outros, e não tanto para o tipo de estrutura onde é aplicado, estes não podem deixar de ser mencionados.

As geomembranas de PEAD, dada a sua elevada resistência química, são maioritariamente aplicadas em aterros de resíduos. As questões de durabilidade neste tipo de material e aplicação têm sido avaliadas, ao contrário das geomembranas de PVC aplicadas em barragens, com base em amostras envelhecidas aceleradamente em laboratório. Esta foi a metodologia utilizada por vários autores, entre os quais Rowe & Sangam (2002); Sangam & Rowe (2002), Rowe *et al.* (2003, 2009); Hsuan *et al.* (2008), Koerner & Koerner (2014) e Koerner *et al.* (2017). Dado não ser objeto do presente trabalho as geomembranas aplicadas em condições de aterro de resíduos, destacam-se, de seguida, apenas os resultados recentemente apresentados por Koerner *et al.* (2017) obtidos sobre geomembranas colocadas em células de incubação semelhantes a aterros (geomembranas não expostas), a 4 temperaturas diferentes (85, 75, 65 e 55°C), até apresentarem um decréscimo de 50 % nos valores da resistência à tração e da correspondente extensão em relação ao seu valor original.

Os autores extrapolaram o tempo de vida útil para temperaturas entre 20 e 40°C, tendo obtido valores entre 445 e 69 anos, conforme pode ver-se na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 - Previsão do tempo de vida de geomembranas de PEAD cobertas, em função da temperatura (Adaptado de Koerner et al., 2017).**

| <b>Temperatura em serviço (°C)</b> | <b>Previsão do tempo de vida útil (anos)</b> |
|------------------------------------|--|
| <b>20</b>                          | 445  |
| <b>25</b>                          | 265  |
| <b>30</b>                          | 166  |
| <b>35</b>                          | 106  |
| <b>40</b>                          | 69   |

Pelos resultados apresentados na Tabela 3.2, é possível observar que a temperatura tem bastante influência na durabilidade de uma geomembrana de PEAD coberta, sendo que quanto mais elevada for a temperatura a que uma geomembrana é sujeita, menor será a sua durabilidade.

Koerner *et al.* (2017) estimaram também o tempo de vida útil de diferentes geomembranas (PEAD, PELBD, PP, PVC) expostas, acrescentado à metodologia de incubação anteriormente referida, as solicitações dos UVs e do oxigênio, para simular as condições de exposição. Os autores obtiveram os valores indicados na Tabela 3.3, calculados com base na resistência à tração e na extensão, para uma temperatura de 20°C.

**Tabela 3.3 - Previsão do tempo de vida de geomembranas expostas, a 20°C, com base na perda de 50% de propriedades mecânicas (Adaptado de Koerner *et al.*, 2017).**

| <b>Geomembrana</b> | <b>Espessura (mm)</b> | <b>Previsão do tempo de vida (anos)</b> |                 |
|--------------------|-----------------------|---|-----------------|
|                    |                       | <b>Resistência à tração</b>             | <b>Extensão</b> |
| <b>PEAD</b>        | 1,5                   | 76                                      | 69              |
| <b>PELBD</b>       | 1,0                   | 49                                      | 46              |
| <b>PP</b>          | 1,0                   | 50                                      | 41              |
| <b>PVC</b>         | 2,5                   | 54                                      | 54              |

Segundo os dados da Tabela 3.3, em condições expostas (sujeitas à ação da temperatura, UV e oxigénio), é possível evidenciar a maior previsão de durabilidade para geomembranas de PEAD em relação a geomembranas de PVC, inclusive de espessura bastante superior.

Koerner *et al.* (2017) propuseram um indicador, definido como a razão entre os tempos de vida útil das geomembranas de PEAD cobertas e expostas, para avaliar a influência das condições de exposição na durabilidade, tendo verificado que o valor deste indicador era 7 vezes superior no caso das geomembranas cobertas.

Em resumo, a durabilidade de uma geomembrana é afetada pelas condições a que o material é sujeito durante o seu período de utilização, tais como pressões hidrostáticas, temperaturas extremas, radiação UV, ação do vento e das ondas, entre outras, bem como pela sua composição e processo de fabrico. Quanto mais resistente for o material às solicitações que lhe vão sendo impostas em condições de serviço, mais durável este será e melhor será também o seu desempenho. Como tal deve existir uma seleção criteriosa do material a utilizar em cada situação, de forma a aumentar as probabilidades de sucesso. Contudo, mesmo aplicando os materiais mais adequados para cada situação, não deixa de ser importante tentar prever qual o tempo de vida útil que uma geomembrana irá apresentar quando sujeita a determinadas condições. Para isso, têm sido utilizadas duas metodologias baseadas na realização de ensaios laboratoriais e posterior comparação com limites definidos como aceitáveis (avaliação da vida útil), quer para amostras recolhidas *in situ*, quer para amostras envelhecidas de forma acelerada. A utilização de amostras envelhecidas naturalmente e recolhidas *in situ* tem sido utilizada para a obtenção da previsão do tempo de vida útil de geomembranas instaladas em barragens, tendo-se obtido previsões bastante superiores a 50 anos para geomembranas de PVC. Por outro lado, amostras envelhecidas aceleradamente são utilizadas para a obtenção mais rápida de resultados sendo este tipo de metodologia mais centrado em geomembranas instaladas em aterros de resíduos. Nestas, os estudos mais recentes indicam previsões para tempo de vida útil das geomembranas entre os 69 e os 445 anos consoante determinadas condições como o tipo de geomembrana, a temperatura ou a utilização de cobertura.



### 3.3 Fugas

As geomembranas, devido ao seu baixo coeficiente de permeabilidade, são geralmente consideradas como impermeáveis. Contudo, pensar que a inexistência de fugas está, por isso, garantida em sistemas de impermeabilização com recurso a este tipo de material é falso, pois tal como referido por Giroud (2016), é prudente contar com a existência de fugas em todos os tipos de sistemas de impermeabilização. Estas são responsáveis pela deterioração das condições geotécnicas (erosão, instabilidade, etc) e pela perda de integridade dos próprios sistemas de impermeabilização.

Segundo Giroud (2016), as fugas ocorrem essencialmente através de orifícios existentes nas geomembranas, os quais ocorrem, maioritariamente, durante a fase de construção. Durante a instalação, a formação de orifícios pode resultar de ações de rasgamento e punçoamento nas geomembranas, causadas pelos trabalhadores, ou pela fraca qualidade das suas soldaduras. Podem ainda ocorrer danos causados pela colocação de materiais sobre a geomembrana, como por exemplo, ações de punçoamento dos materiais utilizados como camada de cobertura para geomembranas cobertas.

O estudo das fugas em geomembranas tem-se dividido em duas grandes vertentes: a deteção e a quantificação do fluxo que atravessa os orifícios.

Do ponto de vista da deteção, Giroud (1984 e 2016) referiu que a maneira mais prática de promover a qualidade de um sistema de impermeabilização, em particular, encontrar danos nas geomembranas é através da implementação de ações que contribuam para a garantia de qualidade de construção.

Contribuir para a garantia da qualidade de construção, durante a instalação de um sistema de impermeabilização, consiste na realização de um conjunto de atividades de garantia de qualidade por parte de uma entidade independente. Essas atividades devem incluir a realização de inspeções e ensaios, entre os quais, ensaios de continuidade das soldaduras.

Segundo Giroud (2016), a implementação dessas atividades pode ser suficiente, no caso de projetos de barragens, uma vez que estes são considerados projetos de primeira categoria, ou seja, dotados de elevada qualidade de mão de obra e de condições de trabalho. No entanto, para projetos considerados mais comuns, como é o caso de aterros de resíduos e reservatórios, essas ações não são consideradas suficientes para a deteção de danos, recorrendo-se, adicionalmente, à deteção com métodos elétricos, cujo princípio de funcionamento foi abordado por Barroso & Lopes (2008).

Durante a realização deste trabalho não foram encontradas quaisquer referências à aplicação desta técnica em geomembranas instaladas em barragens. Dessa forma, recomenda-se que, no futuro, seja estudada a sua aplicabilidade neste tipo de sistema de impermeabilização, em complemento às ações típicas de garantia de qualidade de construção, uma vez que, apesar de estes serem projetos considerados de 1º categoria, tal como referido por Giroud (2016), as atividades típicas “apenas” podem ser suficientes na detecção de danos nas geomembranas.

Com vista à redução do número de danos e consequente diminuição das fugas, para além da importância da detecção dos mesmos, através da implementação de atividades que contribuam para a garantia de qualidade de construção e da utilização de técnicas complementares (detecção elétrica) em projetos mais usuais (aterros e barragens), Giroud (2016) propôs a aplicação de outras medidas, durante a fase de construção, ao nível do projeto, nomeadamente, a utilização de geocompósitos. Segundo o autor, este tipo de solução, na qual a geomembrana é protegida por um geotêxtil, pode apresentar 2 a 4 vezes menos danos na geomembrana que um sistema constituído apenas por uma geomembrana como elemento de impermeabilização.

De acordo com Giroud (2016), outra solução pode passar pelo recurso a sistemas de impermeabilização duplos, constituídos por duas geomembranas separadas por um sistema de drenagem. Neste tipo de solução, o fluxo através dos orifícios existentes na primeira geomembrana é recolhido pelo sistema de drenagem, minimizando o fluxo que atinge a segunda geomembrana.

No que se refere quantificação do fluxo que atravessa os orifícios presentes nas geomembranas, Barroso *et al.* (2006) forneceram um importante resumo sobre as ferramentas disponíveis para o cálculo do mesmo com base num conjunto de equações analíticas e empíricas disponíveis.

Weber & Zorneberg (2007) alertaram para o fato de as ferramentas empíricas disponíveis serem limitadas para o uso em projetos onde a carga hidráulica era baixa, o que tipicamente ocorre em aterros de resíduos. Assim, os autores desenvolveram um programa de ensaios experimentais destinado a quantificar o fluxo através de orifícios existentes numa geomembrana (ocorridos quer durante a instalação quer durante a sua vida útil) quando instalada sob carga hidráulica elevada, condições que ocorrem em barragens. Os resultados experimentais obtidos resultaram numa equação empírica simplificada (Equação 1), a qual serve de base preliminar

para a quantificação do fluxo através de geomembranas instaladas em condições representativas de barragens.

$$Q = 1,07 a^{0,20} \times h_w^{0,95} \times i_s^{-0,33} \times k_s \quad (1)$$

Onde Q é o fluxo, em m<sup>3</sup>/s, a é a área do orifício, em m<sup>2</sup>, h<sub>w</sub> é a carga hidráulica (unitária), i<sub>s</sub> é o gradiente hidráulico (adimensional) e k<sub>s</sub> é a condutividade hidráulica do solo, em m/s.

Os autores salientaram a importância de a equação obtida requerer investigação, no sentido de verificar a sua validade noutras condições, nomeadamente, a dimensão dos orifícios e a condutividade hidráulica do solo.

Giroud (2016) em resposta à questão: “Quão eficazes são as geomembranas no controlo de fugas?” começou por sublinhar que o objetivo do controlo das fugas numa barragem não é o mesmo que em outros projetos mais usuais (aterros ou reservatórios), uma vez que, em barragens existe um fluxo mínimo de água que deve ser emitido para jusante, por questões ambientais. Por essa razão, a existência de fluxo através dos orifícios existentes nas geomembranas superior ao registado no caso de aterros de resíduos ou reservatórios, não é relevante, devendo, no entanto, este ser controlado de forma a prevenir a deterioração do corpo da barragem, através de mecanismos como a erosão interna (em barragens de aterro), a lixiviação (em barragens de betão) ou a pressão da água nos poros que poderão levar à sua instabilidade.

A eficiência das geomembranas no controlo das fugas foi discutida por Giroud (2016), através da utilização de dados sobre a reabilitação de 8 barragens com recurso a geocompósitos, nas quais, obteve o rácio entre os fluxos antes e depois das intervenções. Os resultados demonstraram a existência de variações nos fluxos através de danos nas geomembranas compreendidos entre os 4 e os 1200. O autor referiu que as relações típicas devem variar entre 10 e 100, devendo-se, possivelmente, a diferença para os rácios obtidos, às condições existentes na periferia das geomembranas analisadas.

Giroud (2016) apontou para a redução significativa dos fluxos através de danos nas geomembranas sempre que estas são usadas no paramento de montante de uma barragem, o que prova a sua eficiência. Esta é também a conclusão de Cazzuffi *et al.* (2010), os quais destacaram

os reduzidos fluxos através de danos existentes nas geomembranas, na ordem de poucos l/s para superfícies de 10000 a 30000 m<sup>2</sup>, típicos de geomembranas aplicadas em barragens.

Em resumo, em qualquer sistema de impermeabilização com geomembranas, a ocorrência de fugas deve ser tida em atenção. Estas decorrem de danos causados na geomembrana, sobretudo, durante a fase de construção.

Os estudos sobre fugas em geomembranas têm-se dividido, principalmente em duas vertentes: a detecção de danos e a quantificação do fluxo que ocorre através dos mesmos.

Em relação à detecção de danos nas geomembranas, a implementação de atividades que contribuam para a garantia de qualidade de construção, nomeadamente a inspeção visual e a realização de ensaios de continuidade das soldaduras, tem merecido destaque. A implementação destas atividades, em projetos considerados de 1ª categoria, como é o caso das barragens, pode ser suficiente para a detecção da grande maioria dos danos existentes nas geomembranas. Noutros projetos, como aterros e reservatórios, essas atividades devem ser complementadas com a utilização da técnica de detecção elétrica.

Em relação à quantificação do fluxo através de danos existentes nas geomembranas, destaca-se o desenvolvimento de uma equação empírica para o cálculo do fluxo em condições representativas de uma barragem, ou seja, sob carga hidráulica elevada.

## **3.4 Requisitos de instalação**

### **3.4.1 Soldaduras**

Um bom dimensionamento e a utilização de materiais de elevada qualidade não são suficientes para garantir o sucesso de um sistema de impermeabilização. A qualidade de instalação deve ser considerada tão ou mais importante que os fatores mencionados anteriormente, pois de nada interessa dimensionar da melhor forma ou recorrer aos melhores materiais se no terreno não forem implementados requisitos que garantam a instalação com qualidade. Um dos requisitos mais importantes deverá ser a qualidade com que são executadas as soldaduras das geomembranas, consideradas como pontos chave para o sucesso do funcionamento de um sistema de impermeabilização (Scheirs, 2009 e Peggs *et al.*, 2014).

Rollin *et al.* (1999) relataram que 55% dos danos em geomembranas expostas, ocorrem nas soldaduras, comprometendo a sua integridade e impermeabilidade. Tal como relatado por

Nosko & Touze-Foltz (2000), soldaduras de fraca qualidade são uma das principais causas para a ocorrência de fugas em sistemas de impermeabilização.

A qualidade das soldaduras deve ser avaliada em termos das suas propriedades mecânicas e da sua continuidade. Relativamente às propriedades mecânicas, têm sido realizados vários estudos com vista a avaliar a influência da temperatura ambiente (Lopes *et al.* (2006)), a influência das condições climáticas (Barroso *et al.* (2012)) e a influência dos parâmetros de soldadura (Zhang *et al.* (2017)), todos eles centrados nas geomembranas de PEAD.

Lopes *et al.* (2006) verificaram a influência da temperatura (4°C aos 36°C) na resistência ao arranque de soldaduras duplas, por termofusão, determinada de acordo com a norma ASTM D 6392. Segundo as autoras, esta diminui com o aumento da temperatura, apresentando um comportamento linear. Relataram que o trabalho realizado permitiu obter uma equação que pode ser útil para a avaliação da resistência ao arranque de uma soldadura, quando esta é ensaiada em campo a uma temperatura diferente da normalizada.

Barroso *et al.* (2012) verificaram a resistência ao arranque e a resistência ao corte (norma ASTM D6392), de soldaduras duplas por termofusão, expostas às condições climática em Portugal, não sofreram alterações significativas após 10 anos de exposição. Os resultados obtidos foram também comparados com os valores da especificação GRI-GM 19 (2002), tendo verificado que cumpriam os valores daquela especificação.

Zhang *et al.* (2017) verificaram a influência da temperatura e da velocidade imprimidas ao equipamento de soldar durante o processo de realização das soldaduras, nas suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. Os autores prepararam soldaduras duplas (termofusão), usando diferentes temperaturas e velocidade, apresentadas na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4 - Condições de soldadura (Adaptado de Zhang et al., 2017).**

| <b>Condições da soldadura</b> | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Velocidade (m/min)</b> |
|-------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| <i>Hot and Slow (HS)</i>      | 450                     | 1                         |
| <i>Standard (S)</i>           | 435                     | 1,5                       |
| <i>Cold and Fast (CF)</i>     | 390                     | 2                         |

Os autores indicaram que a monitorização da redução da espessura das geomembranas após o processo de soldadura pode dar uma indicação preliminar sobre a qualidade das soldaduras. A redução de espessura aumenta a concentração de tensões na zona de fusão das geomembranas, originando a existência de menos material capaz de resistir às solicitações impostas (Scheirs, 2009). Segundo Scheirs (2009), a redução da espessura na zona de fusão das geomembranas é dada pela seguinte expressão (Equação 2):

$$Tr = (Tt + Tb) - Tw \quad (2)$$

Onde  $Tr$  é a redução de espessura,  $Tt$  é a espessura da geomembrana superior,  $Tb$ , a espessura da geomembrana inferior e  $Tw$  a espessura da soldadura.

Zhang *et al.* (2017) concluíram que a redução da espessura aumenta com o aumento da temperatura de soldadura. Dada a redução da espessura poder apresentar influência no desempenho da soldadura, nomeadamente em termos de resistência e impermeabilidade, Luders (2000) e Muller (2007) indicaram a necessidade de definir um intervalo de valores aceitável para essa redução. Nesse sentido, a norma alemã DVS 2225 indica, para geomembranas de PEAD com espessuras compreendidas entre os 1,5 e os 2 mm, uma redução de espessura aceitável, compreendida entre 0,2 e 0,8 mm.

Com base nesses limites, Zhang *et al.* (2017) concluíram que as soldaduras S (*Standard*) e CF (*Cold and Fast*) foram aceitáveis, uma vez que apresentaram reduções de 0,66 e 0,23 mm, respetivamente, ao contrário da soldadura HS (*Hot and Slow*) que apresentou uma redução de 1,22 mm.

Para além da redução de espessura, a largura do canal de ar de soldadura duplas, também pode dar indicação sobre a qualidade das soldaduras.

Zhang *et al.* (2017) registaram larguras do canal de ar de 4,33, 6,83 e 12,33 mm para as soldaduras HS (*Hot and Slow*), S (*Standard*) e CF (*Cold and Fast*), respetivamente, concluindo que, a utilização de temperaturas mais elevadas conduz a canais de ar de menores dimensões.

As propriedades mecânicas das soldaduras foram também avaliadas pelos autores, através da realização de ensaios de corte e arranque, segundo a norma ASTM D 6392, verificando que para os ensaios de corte, os resultados foram semelhantes, não dando nenhuma indicação sobre a qualidade das soldaduras, o que é consistente com o preconizado por Peggs

(1994, 1996). Segundo este autor, o ensaio de corte fornece apenas informação sobre a qualidade da geomembrana na zona adjacente à soldadura. Por outro lado, os resultados dos ensaios de arranque indicaram que as soldaduras realizadas a uma temperatura considerada como insuficiente e a elevada velocidade (soldaduras CF), apresentavam menor qualidade, ocorrendo separação das geomembranas na zona da soldadura, o que não se verificou nas restantes (S e HS).

Através de ensaios de medição do tempo de indução da oxidação, Zhang *et al.* (2017) concluíram que os parâmetros de soldadura estudados não apresentaram um impacto significativo na degradação química (perda de antioxidantes) das geomembranas após o processo de soldadura.

As soldaduras em geomembranas de PVC têm sido menos estudadas, destacando-se o trabalho de Thomas & Stark (2003), no qual propuseram que o ensaio de pressão de ar, realizado segundo a norma ASTM D 7177, fosse usado no controlo de qualidade de soldaduras duplas por termofusão, em substituição do ensaio destrutivo de arranque. Para tal, referiram a necessidade de desenvolver uma relação entre a temperatura da geomembrana, a pressão necessária impor no canal de ar da soldadura para causar rebentamento e a força de arranque da soldadura, que permitisse, em campo, determinar a pressão de ar requerida no canal com base na temperatura da geomembrana, de forma a garantir um determinado valor para a força de arranque. Essa relação foi desenvolvida por Thomas *et al.* (2003) e Stark *et al.* (2004) para geomembranas de 0,75 mm a 1,5 mm de espessura, que segundo a norma ASTM D 7408 e o *Fabricated Geomembrane Institute* (FGI, 2004) devem apresentar soldaduras com uma força de arranque de 2,6 N/mm, no mínimo.

Thomas *et al.* (2003) e Stark *et al.* (2004) apresentaram uma relação entre a temperatura da geomembrana, a pressão necessária para causar o rebentamento e a força de arranque da soldadura para temperaturas entre os 5,3°C e os 46,7°C, sendo esta posteriormente revista por Stark & Pazmino (2011) para incluir temperaturas mais elevadas (até 62,8°C). O trabalho iniciado em 2003 e alargado em 2011 culminou no desenvolvimento de uma equação polinomial (Equação 3) que permite converter a temperatura de uma geomembrana na pressão de ar necessária imprimir ao canal, de forma a assegurar uma força de arranque igual ou superior à especificada. Essa equação é apresentada de seguida.

$$\begin{aligned} & \text{Pressão de ar no canal (kPa)} \\ & = 0.093 \times (\text{Temp. } ^\circ\text{C})^2 - 12.061 \times (\text{Temp. } ^\circ\text{C}) + 464.39 \quad (3) \end{aligned}$$

Segundo Stark e Pazmino (2011), a relação obtida (Equação 3) pode ser utilizada para geomembranas com espessura de 0,75 mm ou superior. Em alternativa, podem também ser utilizados os valores da Tabela 3.5, para geomembranas de 0,75 mm de espessura.

**Tabela 3.5 - Pressão de ar necessária no canal para garantir a força de arranque especificada para geomembranas de PVC de 0,75 mm.**

| <b>Temperatura da geomembrana<br/>(°C)</b> | <b>Pressão de ar (kPa)</b> | <b>Tempo no qual a pressão se<br/>deve manter (s)</b> |
|--|----------------------------|---|
| <b>5,3</b>                                 | 412,7                      | 30  |
| <b>9,7</b>                                 | 361,1                      | 30  |
| <b>14,8</b>                                | 285,7                      | 30  |
| <b>22,8</b>                                | 240,7                      | 30  |
| <b>35</b>                                  | 159,5                      | 30  |
| <b>46,7</b>                                | 120,9                      | 30  |
| <b>54,4</b>                                | 98                         | 30  |
| <b>60</b>                                  | 85,6                       | 30  |
| <b>62,8</b>                                | 80,2                       | 30  |

Com base no exposto, verifica-se que os estudos sobre soldaduras se têm debruçado sobretudo em geomembranas de PEAD, onde é investigada a influência da temperatura ambiente, das condições climáticas e dos parâmetros de soldadura sobre as propriedades mecânicas das mesmas. Dado que em barragens as geomembranas mais usadas são as de PVC, seria de grande utilidade aprofundar o conhecimento sobre as soldaduras deste tipo de geomembranas, em particular estender o trabalho realizado por Lopes *et al.* (2006). Nesse âmbito, no capítulo 4, apresenta-se o trabalho experimental realizado com vista a estudar a



influência da temperatura ambiente sobre a resistência mecânica das soldaduras em geomembranas de PVC.

### 3.4.2 Dobras

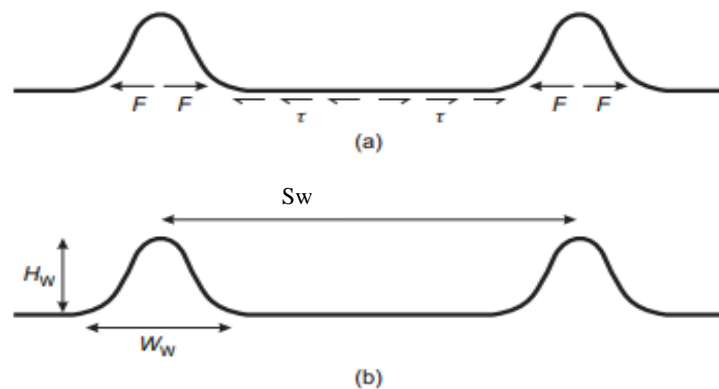
Outro importante requisito para a promoção da qualidade na instalação de um sistema de impermeabilização é a minimização da formação de dobras nas geomembranas pois, de acordo com Rowe (1998, 2005, 2012), o fluxo através de danos em geomembranas, é muito maior quando estes estão localizados em zonas coincidentes com a formação de dobras ou próximas destas.

As geomembranas expostas à radiação solar podem atingir temperaturas bastante elevadas, proporcionando a sua expansão térmica, tanto maior quanto maior for o seu coeficiente de expansibilidade térmica. A existência de limitações no plano de expansão impede o “crescimento das geomembranas” originando nas mesmas a formação de dobras, que podem entender-se como a separação física (espaço de ar) entre a geomembrana e o material subjacente, como mostra a Figura 3.1.



**Figura 3.1 - Dobra (Adaptado de Chappel *et al.*, 2008).**

A formação de dobras em geomembranas tem sido estudada ao longo dos tempos, destacando-se como um dos primeiros e mais importantes trabalhos sobre o assunto o de Giroud & Morel (1992), no qual, os autores teceram considerações teóricas sobre dobras e analisaram a influência do tipo, da cor e da textura da geomembrana para a sua formação. Os autores referem que existem duas forças,  $F$ , opostas na base de uma dobra, como mostra a Figura 3.2(a). Estas são proporcionais ao módulo de elasticidade do material e à 3ª potência da sua espessura, sendo também função do tamanho e da forma das dobras.



**Figura 3.2 - Equilíbrio e geometria de uma dobra (Adaptado de Giroud, 2005).**

As duas forças  $F$ , devem ser equilibradas por forças externas, opostas e aplicadas nos pontos da geomembrana em contacto com o solo. Estas são a soma das forças de corte,  $\tau$ , resultantes do peso da geomembrana e do atrito na interface com o solo, sendo por isso, proporcionais à massa por unidade de área da geomembrana, à distância entre dobras e ao coeficiente de atrito na interface solo/geomembrana. Para os autores, a geometria de uma dobra, como mostra a Figura 3.2(b), é dada pela sua altura,  $H_w$ ; largura,  $W_w$ ; e distância entre os centros de dobras adjacentes,  $S_w$ . Esta é função da distância entre as dobras adjacentes, do coeficiente de expansão térmica do material e da diferença de temperatura a que a geomembrana foi submetida desde a última vez em que foi colocada plana.

Sobre a influência do tipo de geomembrana, da sua cor e da condição da sua superfície (lisa ou texturada) para a formação de dobras (Tabela 3.6), Giroud & Morel (1992) apresentaram as seguintes conclusões:

- As geomembranas de PVC apresentam dobras bastante mais pequenas e espaçadas entre si que as geomembranas de PEAD; A justificação está no módulo de elasticidade mais reduzido do PVC, o que permite que as forças  $F$  sejam pequenas e que apenas um curto espaço entre dobras seja suficiente para gerar atrito na interface com o solo de modo a equilibra-las;
- A cor tem uma influência reduzida na altura das dobras, mas bastante elevada no seu espaçamento. O dobro do espaçamento é obtido para geomembranas de cor branca em relação a geomembranas de cor negra;

- A textura de uma geomembrana tem influência quer na altura quer no espaçamento entre dobras. Geomembranas texturadas, têm dobras menores e menos espaçadas do que geomembranas com superfície lisa.

**Tabela 3.6 - Influência do tipo, cor e textura de uma geomembrana na formação de dobras (Adaptado de Giroud, 2005).**

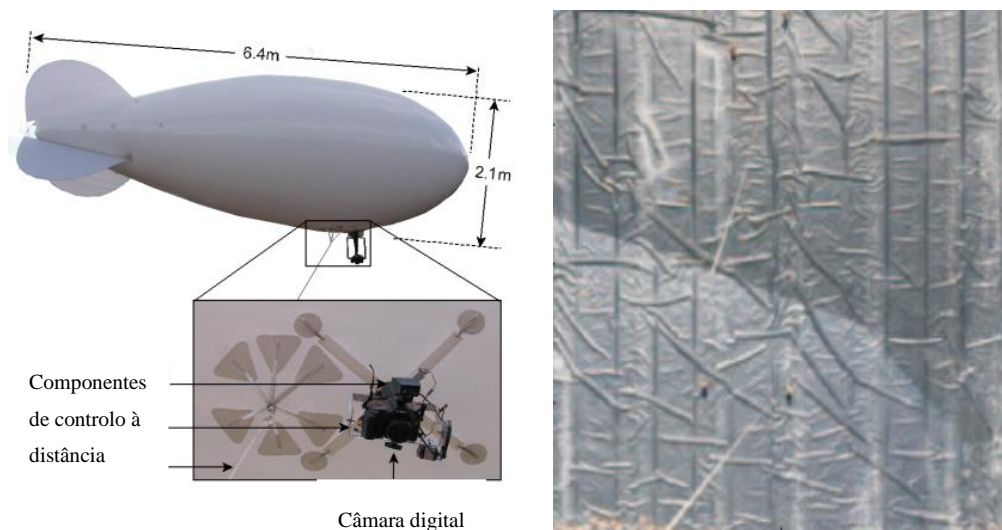
| Tipo de geomembrana e condição da superfície |           | Altura da dobra (mm) | Espaço entre dobras (m) |        |
|--|-----------|----------------------|-------------------------|--------|
|  |           |                      | Preta                   | Branca |
| PEAD   | Lisa      | 60                   | 7.5                     | 15     |
|  | Texturada | 40                   | 5                       | 10     |
| PVC  |           | 10                   | 1                       | 2      |

Giroud & Morel (1992) sugeriram quais as propriedades do material mais relevantes a ter em consideração na previsão da formação de dobras. Estes referiram que para além do coeficiente de expansibilidade térmica, o módulo de elasticidade também deve ser analisado, sendo recomendável optar-se por uma geomembrana com baixo módulo de elasticidade, de forma a minimizar a formação de dobras.

Outros trabalhos têm sido realizados, concentrando-se, sobretudo, na utilização de geomembranas de PEAD instaladas em aterros de resíduos, nos quais, os principais desenvolvimentos passaram pela implementação de um método de campo destinado a facilitar a análise e quantificação das dobras (Chappel *et al.* (2007) e Take *et al.* (2007)), pela análise da influência da temperatura na sua formação (Chappel *et al.* (2012) e Rowe *et. al* (2012)) e pela definição de métodos para a promoção de maior contacto entre as geomembranas e o material subjacente (GSI, 2013).

Chappel *et al.* (2007) e Take *et al.* (2007) apresentaram um método para quantificação das dobras ocorridas em geomembranas expostas baseado na captura de fotografias aéreas a baixa altitude e no processamento digital de imagens (Figura 3.3). Este assumiu-se como uma ferramenta útil e eficaz na quantificação de dobras a larga escala, considerando-as como ondas, aproximadamente lineares, nas quais existe um espaço de ar entre a geomembrana e o material

subjacente que exceda os 3 cm de altura. O método permitiu ainda a avaliação do comprimento de potenciais caminhos para os fluxos provenientes de fugas através da consideração da existência de conectividade hidráulica suficiente entre dobras que a leve a considera-las como uma só de maior comprimento.



**Figura 3.3 - Quantificação de dobras através do método de fotografia aérea a baixa altitude e processamento digital de imagens (Adaptado de Take et al., 2007).**

Os autores destacaram que com a utilização do método era possível quantificar o número de dobras existente a uma determinada hora, num determinado dia e local, a condições climáticas específicas, bem como avaliar a sua conectividade, de uma forma mais simplificada. Nesse sentido, Take *et al.* (2007) apresentaram resultados para uma geomembrana de 1,5 mm, os quais demonstraram que para um determinado dia (17/08/2006), a uma determinada hora (16.00h), existiam 100 dobras com mais de 3 cm de altura e que 90% das mesmas eram hidraulicamente conectáveis, originando um comprimento de 520 m. Os autores referem que a utilização desta ferramenta permite investigar a influência de determinados fatores no processo da formação de dobras, nomeadamente, o efeito da temperatura da geomembrana, dos materiais e das técnicas de instalação.

O efeito da temperatura na formação de dobras em geomembranas foi analisado por Rowe *et al.* (2012) e Chappel *et al.* (2012) através da sua quantificação ao longo do período de um dia, no verão, na América do Norte, Canadá. Segundo os autores, o número de dobras aumentou ao longo da manhã, apresentando o seu máximo após as 12h, diminuindo depois à

medida que a noite se aproximou. Às 08.45h o número de dobras representava 3% da área total, às 12.45h representava 20% e às 17.15h representava 7%. O comprimento máximo de dobras conectadas registrado foi de 600m/ha registrado às 13.45h enquanto o mínimo foi de 150m/ha às 8.45h. Os resultados apresentados permitiram concluir que a formação de dobras está fortemente relacionada com a temperatura da geomembrana, que por sua vez é influenciada pela radiação solar. Quanto maior for a radiação solar a que uma geomembrana é sujeita, maior será a sua temperatura e consequentemente mais dobras se formam.

Como referido anteriormente, a formação de dobras nas geomembranas é prejudicial pelo fato de estas constituírem caminhos preferências para os fluxos. Contudo, esta não é a única consequência a ter em conta, uma vez que o aumento das tensões em determinadas zonas da geomembrana, provocada pela formação de dobras, sujeita o material ao fenómeno de *stress cracking*, no caso de geomembranas de PEAD, originando a formação de fissuras que comprometem a integridade e a durabilidade do revestimento de impermeabilização. Como tal, a promoção de ações que previnam a formação de dobras nas geomembranas torna-se bastante importante durante a sua instalação. Nesse sentido, o *Geosynthetic Institute* (GSI) publicou o documento GSI White Paper #27 (2013), no qual são apresentados cinco métodos para a instalação de geomembranas com o fim de evitar a formação de dobras, promovendo um maior contacto entre a geomembrana e o material subjacente (“*intimate contact*”). A Tabela 3.7 apresenta-os, bem como às suas respetivas vantagens desvantagens.

**Tabela 3.7 - Métodos de promoção de maior contato entre a geomembrana e o material subjacente (Adaptado de GSI, 2013).**

| <b>Método</b>   | <b>Vantagens</b>                           | <b>Desvantagens</b>                                |
|---|--|--|
| <b>Folga adequada dos painéis (remoção do material em excesso)</b>                                  | Rápido e barato                            | Potencial realização de soldaduras por extrusão    |
| <b>Fixação das extremidades adequada</b>  | Elevada utilidade                          | Lento e dispendioso                                |
| <b>Geomembranas ou geotêxteis de cor clara</b>  | Rápido e fácil                             | Potencial formação de dobras de pequenas dimensões |
| <b>Promover a cobertura</b>   | Baixa utilidade                            | Dispendioso; Baixa produtividade                   |
| <b>Colocação do material sobrejacente nas horas em que a temperatura é mais baixa (manhã/noite)</b> | Aproveitar condições climáticas favoráveis | Produtividade limitada; Segurança                  |

O impacto da cor das geomembranas sobre a formação de dobras foi estudado por Rentz *et al.* (2017). Os autores quantificaram e compararam as dobras formadas em geomembranas expostas de PEAD de 1,5 mm de espessura de cor branca e de cor preta durante dois dias de verão, nos quais, registaram temperaturas máximas atingidas pela geomembrana de cor branca de 21 a 23 ° C, bastante mais baixas que as registadas para a geomembrana de cor negra. A geomembrana de cor branca apresentou dobras que se formaram ao final da manhã, desaparecendo estas mais cedo no período noturno, em relação às geomembranas de cor negra, e sendo menos frequentes na parte mais quente do dia (aproximadamente 12 versus 24% da área). A conectividade entre as dobras ocorridas nas geomembranas de cor branca ocorria num comprimento mais curto, cerca de 21% do que para as dobras ocorridas nas geomembranas de cor negra.

Rentz *et al.* (2017) concluíram que a aplicação de geomembranas de cor branca pode ser uma boa estratégia para a redução da formação de dobras.

Ping Yang *et al.* (2017) investigaram a viabilidade da utilização de modelos numéricos para a reprodução de dobras em geomembranas de PEAD com 2 mm de espessura expostas à radiação solar. Os autores relatam que a relação entre a temperatura da geomembrana (T em °C) e o coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) pode ser dado pela Equação 4:

$$\alpha = 4 \times 10^{-4} - 7 \times 10^{-6} \times T + 8 \times 10^{-8} \times T^2 \quad (4)$$

O coeficiente de expansão térmica é utilizado, em conjunto com o módulo de elasticidade do material, dependendo da temperatura, como dados de partida para a reprodução numérica de dobras em geomembranas quando sujeitas ao aquecimento pela exposição solar. Ping Yang *et al.* (2017) relatam que, mesmo não tendo uma relação linear, a altura e a largura das dobras aumentam e diminuem no mesmo sentido que a temperatura e podem ser expressas pelas Equações empíricas 5 e 6:

$$h = h_m \times e^{\frac{p_{h1} + \frac{p_{h2}}{\sqrt{\Delta T \times L}}}{\Delta T \times L}} \quad (5)$$

$$w = w_m \times \frac{p_{w1} \times \Delta T \times L}{p_{w2} + \Delta T \times L} \quad (6)$$

Onde h é a altura da dobra (cm), w a largura da dobra (cm),  $h_m$  a altura máxima da dobra (cm),  $w_m$  a largura máxima da dobra (cm), L o comprimento da geomembrana (cm) e  $\Delta T$  a diferença inicial de temperatura (°C). Ainda,  $p_{h1} = 1,04$ ;  $p_{h2} = -105,63$ ;  $p_{w1} = 0,99$  e  $p_{w2} = 466,92$ .

Segundo os autores os resultados obtidos pelas equações 5 e 6, para a altura e para a largura de dobras em geomembranas de PEAD de 2 mm, não são muito diferentes dos alcançados em campo, apresentando erros na ordem dos 5 a 6 %, o que mostrou que a simulação numérica para a reprodução de dobras pode ser um método eficaz, contudo, necessitando ainda de maior investigação para outras espessuras e tipos de material.

Face ao exposto, constatou-se que os desenvolvimentos sobre a formação de dobras em geomembranas permitiram conhecer métodos mais simples e eficazes para a sua quantificação,

bem como a forte influência da temperatura e da cor do material na sua formação. Métodos para promover um maior contacto entre o material e o solo subjacente foram apresentados, estudando-se ainda a viabilidade da aplicação de modelos numéricos para a previsão da formação de dobras. Contudo, todos os desenvolvimentos referidos apresentaram como foco a utilização de geomembranas de PEAD aplicadas em condições características de aterros de resíduos.

Relativamente a outras aplicações das geomembranas, nomeadamente sobre geomembranas aplicadas em barragens, não foram encontrados desenvolvimentos acerca da formação de dobras. Esse fato alerta para a necessidade de maior investigação sobre o assunto, no futuro, para diferentes tipos de material e condições de instalação, como por exemplo, para geomembranas de PVC instaladas em barragens.

### **3.4.3 Condições da superfície de apoio**

A qualidade da superfície de apoio para uma geomembrana é definida pela forma como a sua preparação é executada, devendo este ser um requisito de instalação com o objetivo de promover a qualidade de um sistema de impermeabilização.

Preparar a superfície de apoio de uma geomembrana implica a seleção, de forma criteriosa, dos materiais que a constituem quanto à forma, tamanho e distribuição, no sentido de impedir a ocorrência, quer durante a construção, quer durante o tempo de serviço, de danos na geomembrana que propiciem a ocorrência de fluxos através de danos existentes nas mesmas.

Segundo Müller & Wöhlecke (2017) existem critérios técnicos e geométricos para a seleção dos materiais da superfície de apoio de uma geomembrana. Esses critérios do *Federal Institute for Materials and Testing* (BAM) têm sido aplicados na construção de aterros na Alemanha, com recurso a geomembranas de PEAD.

Também para geomembranas de PVC existem critérios relativos à promoção da qualidade da superfície de apoio elaborados, em 2010, pelo *Fabricated Geomembrane Institute* (FGI).

De uma forma geral, com base nas recomendações do BAM e do FGI, a superfície de apoio deve ser plana, estável, homogénea, firme, sem depressões, livre de qualquer presença de água, lamas, vegetação, detritos ou outros materiais nocivos. A dimensão dos agregados deve ser inferior a 10 mm, devendo proceder-se à remoção das partículas com dimensões superiores a este valor. No caso de geomembranas de PVC reforçadas com geotêxtil (geocompósitos), as



dimensões dos agregados presentes na superfície poderão ser superiores, embora não excedendo os 100 mm.

### 3.5 Considerações finais

Neste capítulo apresentaram-se os principais desenvolvimentos alcançados sobre a utilização de sistemas de impermeabilização com geomembranas em barragens, nomeadamente, a sua durabilidade, a ocorrência de fugas e os requisitos de instalação mais importantes, como as soldaduras, as dobras e as condições da superfície de apoio.

A durabilidade de uma geomembrana é afetada pelas solicitações impostas ao material durante o seu período de utilização, bem como pela sua composição e processo de fabrico, pelo que é importante avaliar o tempo de vida útil de uma geomembrana. A previsão da vida útil de uma geomembrana tem sido realizada com base em resultados obtidos em ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas *in situ* ou amostras envelhecidas de forma acelerada. Para geomembranas de PVC, o tempo de vida útil estimado é superior a 50 anos.

Os desenvolvimentos sobre a ocorrência de fugas permitiram constatar que a frequente implementação de atividades de garantia de qualidade de construção contribuem para a redução do número de danos nas geomembranas, minimizando o fluxo através dos mesmos. Verificou-se, também, a existência de várias ferramentas para o cálculo do fluxo através de orifícios nas geomembranas, destacando-se, uma equação empírica especialmente desenvolvida para condições representativas de uma barragem.

No que diz respeito aos principais requisitos de instalação, constatou-se que a qualidade das soldaduras duplas em geomembranas de PVC em termos de resistência mecânica pode ser controlada através do ensaio de pressão de ar, realizado segundo a norma ASTM D 7177, em substituição do ensaio destrutivo de arranque. A questão da avaliação da qualidade das soldaduras em geomembranas de PVC carece ainda de investigação.

Quanto às dobras, verificou-se que o coeficiente de expansibilidade térmica e o módulo de elasticidade da geomembrana são as propriedades do material com maior influência na sua formação. O tipo de geomembrana, a cor e a textura são também determinantes na formação de dobras. As geomembranas de PVC apresentam dobras bastante mais pequenas e espaçadas entre si que as geomembranas de PEAD. A cor tem uma influência reduzida na altura das dobras, mas bastante elevada no seu espaçamento, verificando-se o dobro do espaçamento para

geomembranas de cor branca relativamente a geomembranas de cor negra. As geomembranas texturadas apresentam dobras menores e com menor espaçamento do que geomembranas lisas.

Por último, verificou-se que a superfície de apoio deve ser plana, estável, homogénea, firme, sem depressões, livre de qualquer presença de água, lamas, vegetação, detritos ou outros materiais nocivos, e que a dimensão dos agregados deve ser inferior a 10 mm. No caso de geomembranas de PVC reforçadas com geotêxtil (geocompósitos), as dimensões dos agregados presentes na superfície poderão ser superiores, embora não excedendo os 100 mm.

## Trabalho experimental

### 4.1 Introdução

As geomembranas de PVC são as mais utilizadas na impermeabilização de barragens. As soldaduras neste tipo de material são normalmente executadas através de métodos térmicos e a sua resistência mecânica deve ser avaliada através de ensaios destrutivos, de corte e de arranque, os quais conduzidos em laboratório e em campo, segundo a norma ASTM D 6392. No ensaio de arranque avalia-se a qualidade de ligação entre dois painéis de geomembrana (Peggs & Little, 1985), enquanto no ensaio de corte se avalia de que forma o processo de soldadura afeta a resistência da geomembrana adjacente à soldadura (Peggs, 1990; Haxo & Kamp, 1990).

Os ensaios, de acordo com a norma ASTM D 6392, devem ser realizados à temperatura de 23°C ( $\pm 2^\circ\text{C}$ ). Contudo, em campo, por vezes não é possível assegurar tal condição, o que pode levantar questões sobre a aceitação/rejeição de soldaduras. É, por isso, bastante importante verificar a influência da temperatura nos resultados dos ensaios mecânicos às soldaduras de geomembranas, no sentido de perceber qual o impacto da sua realização a temperaturas diferentes da indicada pela norma. Esse trabalho foi realizado por Lopes *et al.* (2006) para geomembranas de PEAD, afigurando-se como útil o seu aprofundamento para outro tipo de geomembranas, designadamente para as mais usadas em barragens.

Neste capítulo, apresenta-se o trabalho experimental realizado com vista a estudar o impacto da temperatura sobre a resistência mecânica das soldaduras de geomembranas de PVC. Em primeiro lugar, descrevem-se os materiais e método de ensaio utilizados. Seguidamente, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos e, por último, as principais conclusões alcançadas.

## 4.2 Materiais

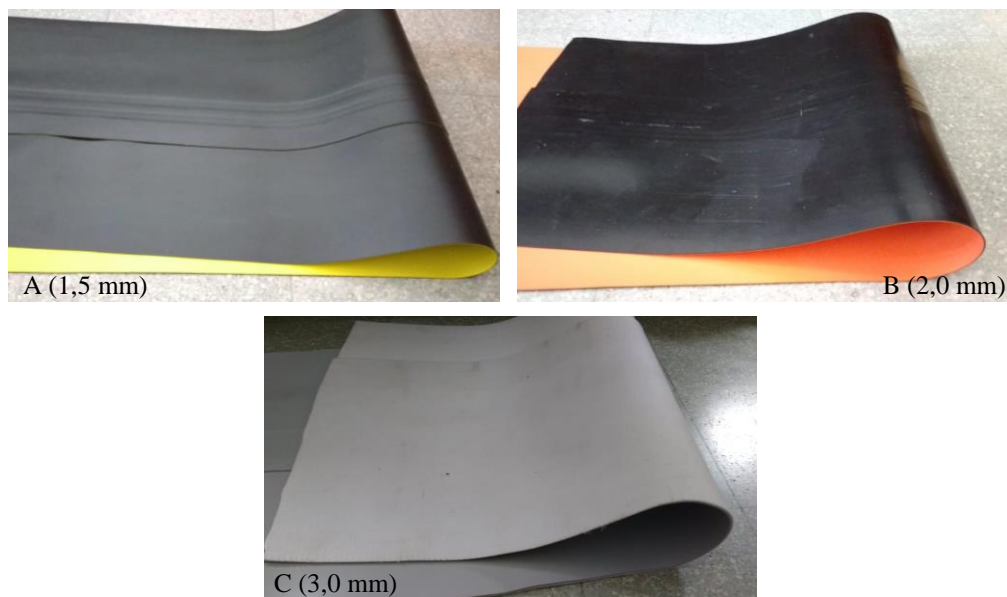
Foram utilizadas três geomembranas de PVC, com espessuras diferentes, designadas por geomembranas A, B e C, cujas características, segundo a ficha técnica disponibilizada pelo fabricante, são apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 - Características das geomembranas usadas, de acordo com as fichas técnicas.**

| <b>Propriedades</b>                                  | <b>Geomembrana A</b> | <b>Geomembrana B</b>                                       | <b>Geomembrana C</b>                             |
|--|----------------------|--|--|
| <b>Cor<br/>(superior/inferior)</b>                   | Amarela/Preta        | Laranja/Preta  | Cinzenta   |
| <b>Espessura<br/>(mm)</b>                            | 1,5<br>(EN 1849-2)   | 2,0<br>(EN 1849-2)   | 3,0<br>(EN 1849-2)                               |
| <b>Massa surfática<br/>(g/m<sup>2</sup>)</b>         | 1950<br>(EN 1849-2)  | 2740<br>(EN 1849-2)  | -  |
| <b>Massa volúmica<br/>(g/m<sup>3</sup>)</b>          | -                    | -  | 1,25<br>(EN ISO 1183-1)                          |
| <b>Resistência à tração<br/>na rotura<br/>(kN/m)</b> | 22,5<br>(EN 12311-2) | 30<br>(EN ISO 527-1 e 3,<br>provete tipo 5,<br>100mm/min)  | 30<br>(EN ISO 527-4,<br>100mm/min)               |
| <b>Extensão na rotura<br/>(%)</b>                    | 300<br>(EN 12311-2)  | 250<br>(EN ISO 527-1 e 3,<br>provete tipo 5,<br>100mm/min) | 250<br>(EN ISO 527-4,<br>100mm/min)              |
| <b>Resistência ao<br/>rasgamento<br/>(kN/m)</b>      | -                    | ≥ 45<br>(ISO 34, método B, fig.2,<br>500mm/min)            | ≥ 130<br>(ISO 34, método B,<br>fig.2, 500mm/min) |
| <b>Flexibilidade a<br/>baixas temperaturas</b>       | -                    | S/quebras ou fissuras a -<br>25°C<br>(EN 495-5)            | S/quebras ou<br>fissuras a -30°C<br>(EN495-5)    |

De cada geomembrana, foi preparada, pelo fabricante, uma amostra de soldadura por termofusão, através da utilização de ar quente, com recurso a equipamento próprio. As geomembranas A e B apresentavam soldaduras duplas (c/canal de ar), ao contrário da geomembrana C que apresentava soldadura simples (s/canal de ar), conforme se pode ver na Figura 4.1.

A amostra da geomembrana C continha um geotêxtil acoplado na geomembrana inferior, o qual se optou por retirar, de forma a que todas as amostras se encontrassem nas mesmas condições.



**Figura 4.1 – Geomembranas utilizadas.**

### **4.3 Método**

De cada amostra de geomembrana, foram cortados provetes, com a soldadura localizada a meio (Figura 4.2). Foram realizados ensaios de resistência mecânica das soldaduras, em laboratório, de acordo com a norma ASTM D 6392, a condições de temperatura diferentes.

As diferentes condições de temperatura foram alcançadas através da colocação dos provetes em ambientes condicionados a uma determinada temperatura, durante, no mínimo 40 horas, tal como indicado na norma ASTM D 6392. Foram ensaiados provetes das três amostras a doze temperaturas diferentes, as quais foram alcançadas recorrendo à utilização de duas câmaras climáticas (uma para temperaturas mais baixas e outra para temperaturas mais altas). O

condicionamento foi controlado ao longo das 40 horas para cada uma das temperaturas pretendidas, verificando-se através da colocação de termômetros dentro das próprias câmaras climáticas, se a temperatura pretendida para a realização dos ensaios se mantinha constante.



**Figura 4.2 - Provetes utilizados.**

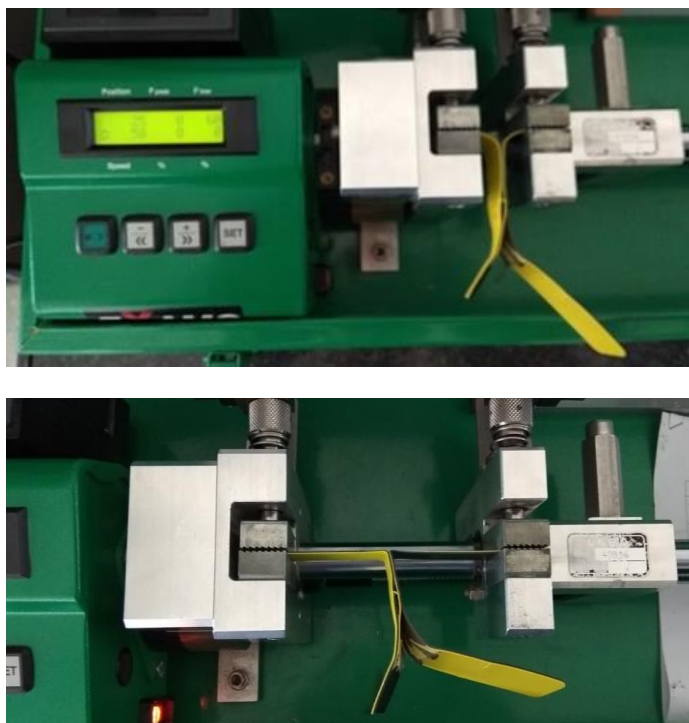
Para além da temperatura ambiente foram medidas individualmente as temperaturas de cada provete através de um termómetro a laser de infravermelhos, verificando-se que não existiam diferenças significativas. Optou-se, assim, por usar os valores da temperatura ambiente.

As amostras foram ensaiadas às seguintes temperaturas: 5, 7, 10, 14, 16, 20, 23, 27, 30, 33, 37 e 41°C, sendo 23°C a temperatura normalizada, a qual servirá de referência.

Embora a norma ASTM D 6392 preconize a realização de ensaios de arranque e de corte aos provetes, neste trabalho apenas se procedeu à realização do ensaio de arranque para cada uma das três amostras. A realização do ensaio de corte não foi concretizada devido a limitações no equipamento de tração utilizado, uma vez que a norma ASTM D 6392 recomenda que os provetes sejam submetidos a uma força de tração (corte) com uma velocidade de 500mm/min, a qual não é permitida pelo aparelho utilizado que apenas permite uma velocidade máxima de 300mm/min. Desta forma, optou-se por não realizar o ensaio fora das recomendações apresentadas pela norma.

Os resultados dos ensaios, segundo a referida norma, devem ser apresentados em termos de resistência ao arranque e ao corte, tipo de rotura, separação (ensaio de arranque) e extensão (ensaio de corte). Relativamente aos últimos dois verificou-se que não foi possível a sua determinação no ensaio de arranque porque não ocorreu separação na zona soldada e os ensaios de corte não foram realizados.

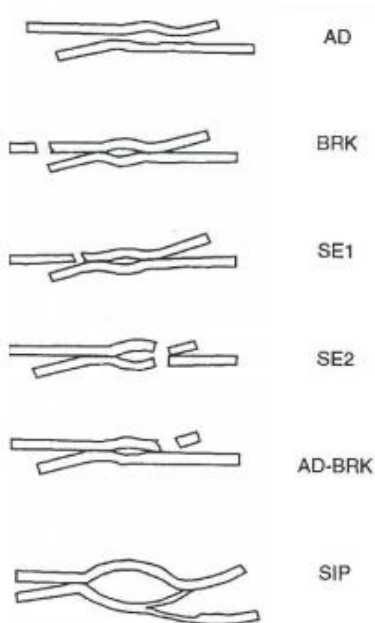
No ensaio de arranque, para cada temperatura, foram ensaiados 5 provetes, com 25 mm de largura e 150 mm de comprimento, os quais foram ensaiados num equipamento de tração – *Leister EXAMO 300F*. No equipamento, os provetes foram fixados por umas garras de 25 mm de largura, distanciadas inicialmente 25 mm. Foram, seguidamente, submetidos a força de tração (arranque) com uma velocidade de 50 mm/min até à rotura (Figura 4.3).



**Figura 4.3 - Ensaio de arranque.**

O ensaio foi realizado para ambos os lados das soldaduras duplas das amostras das geomembranas A e B, como indicado pela norma ASTM D 6392, registando-se, para cada um dos lados, a força de arranque em kN/m (resultado do quociente entre a força fornecida pelo equipamento, em Newton e a largura do provete de 25,4 mm). Para a geomembrana C, apenas se registou um valor para a força de arranque, uma vez se tratar de uma amostra de soldadura simples.

Para além da força de arranque foram, igualmente, registados os tipos de rotura para as três amostras, de acordo com o preconizado na norma ASTM D 6392 e apresentado na Figura 4.4.



**Figura 4.4 – Tipos de rotura (ASTM D 6392).**

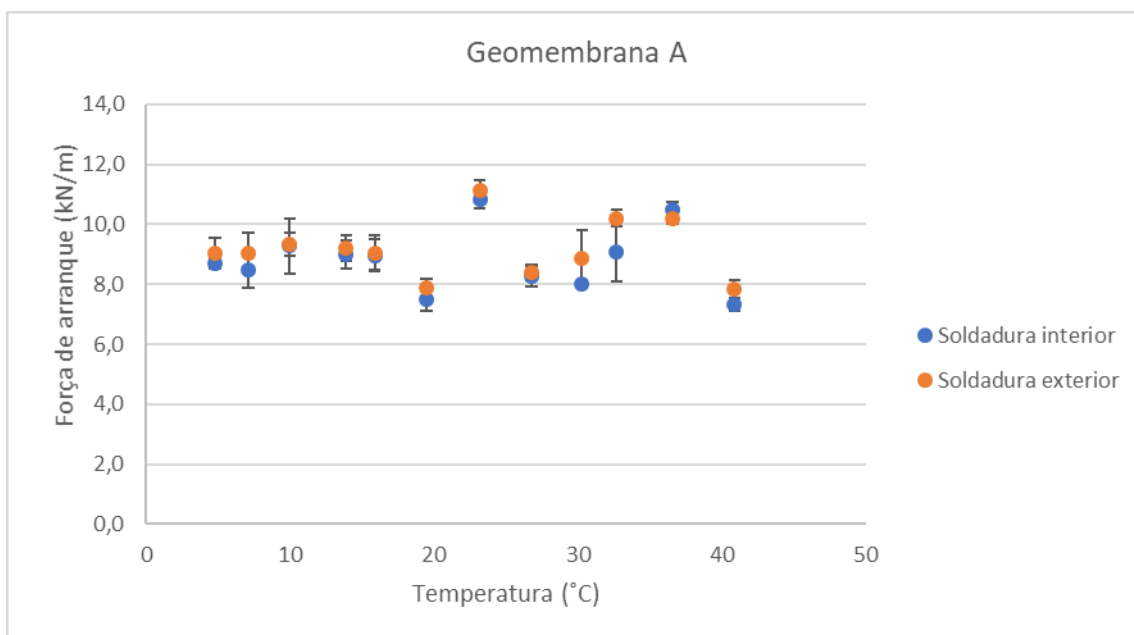
## **4.4 Apresentação e discussão dos resultados**

### **4.4.1 Influência da temperatura na força de arranque das soldaduras**

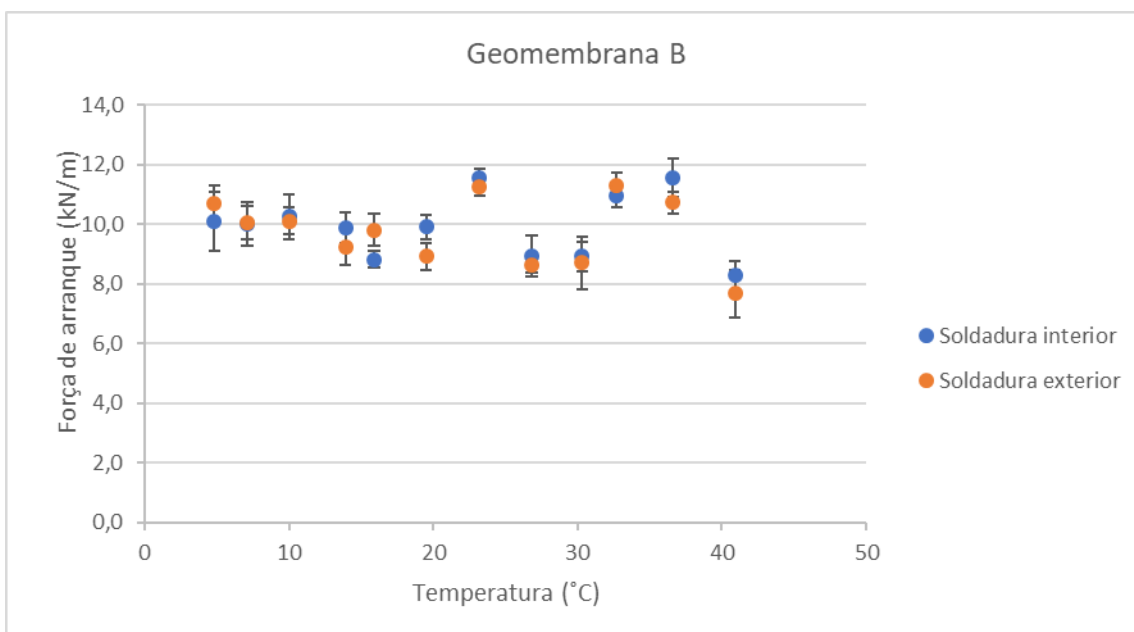
A força de arranque obtida a diferentes temperaturas para as geomembranas A, B e C, pode ser observada nas Figuras 4.5, 4.6 e 4.7, respetivamente. Para as geomembranas A e B os resultados são apresentados para as soldaduras interior e exterior, enquanto, para a geomembrana C, devido à soldadura ser simples, os resultados dizem respeito apenas a uma soldadura.

Os valores de força de arranque apresentadas correspondem à média dos cinco provetes ensaiados. Os gráficos incluem ainda as barras de erro correspondentes ao desvio-padrão. Os resultados individuais, para cada provete a cada temperatura considerada, são apresentados no Anexo A3 nas Tabelas A3.1 a A3.5, para as geomembranas A, B e C.

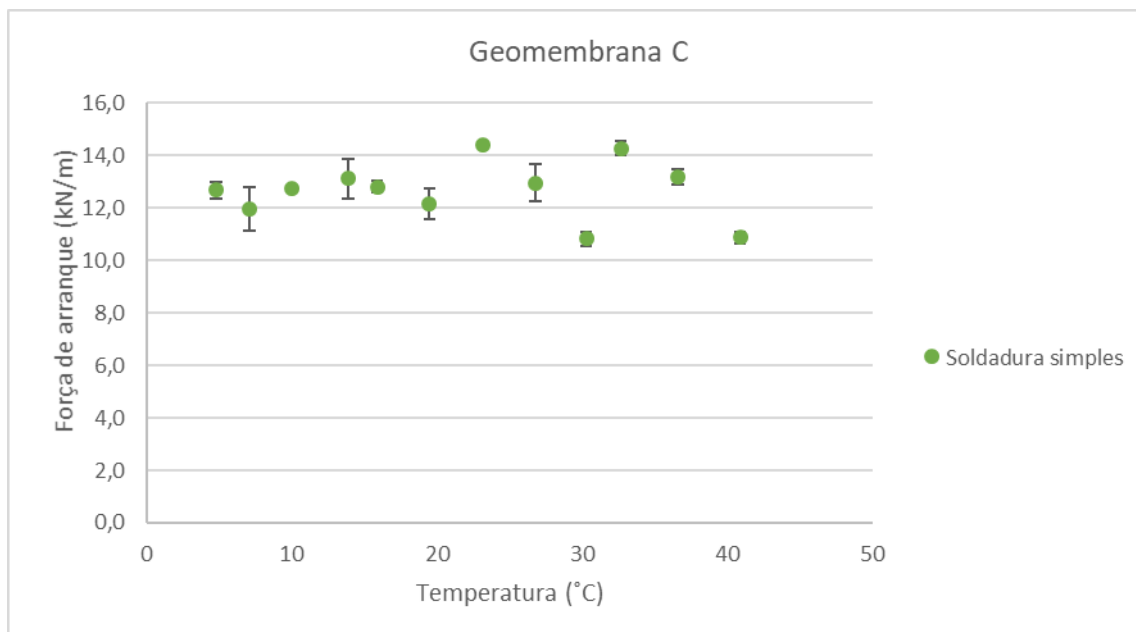




**Figura 4.5 - Geomembrana A: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.**



**Figura 4.6 - Geomembrana B: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.**



**Figura 4.7 - Geomembrana C: relação entre a força de arranque das soldaduras e a temperatura.**

No que se refere à geomembrana A (Figura 4.5), verifica-se que a força de arranque oscila entre 7,3 kN/m (40,9 °C) e 10,8 kN/m (23,2°C), para a soldadura interior, e entre 7,8 kN/m (40,9 °C) e 11,1 kN/m (23,2°C), para soldadura exterior. Para a geomembrana B (Figura 4.6), a força de arranque varia entre 8,3 kN/m (40,9°C) e 11,6 kN/m (23,2 e 36,6°C), para a soldadura interior, e entre 7,7 kN/m (40,9°C) e 11,3 kN/m (23,2 e 36,6°C), para a soldadura exterior. Observa-se que existe um comportamento semelhante entre as soldaduras interior e exterior das geomembranas A e B.

Para a geomembrana C, a força de arranque está compreendida entre 10,8 kN/m (30,3°C) e 14,4 kN/m (23,2°C), de acordo com a Figura 4.7.

Em termos gerais, os valores obtidos para a força de arranque foram relativamente constantes para as diferentes temperaturas, tendo em conta o desvio padrão calculado (representado pelas barras de erro). A variação máxima registada foi 4 kN/m, o que sugere que a temperatura não influencia significativamente a resistência mecânica das soldaduras. No entanto, observa-se que a força de arranque apresenta maior dispersão para temperaturas superiores à normalizada ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ), não sendo evidente a causa deste comportamento.

A reduzida influência da temperatura sobre a força de arranque pode estar relacionada com a estrutura molecular do PVC. Segundo Jansen (2016), a estrutura molecular influencia as

propriedades mecânicas do material. Sob efeito da temperatura, os polímeros amorfos, tal como o PVC, exibem um módulo de elasticidade relativamente constantes num intervalo de temperaturas considerável, apresentando alterações apenas à medida que esta se aproxima da sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ), tal como observado na Figura 4.8.



**Figura 4.8 - Influência da temperatura no módulo de elasticidade de polímeros amorfos e semicristalinos.** (<https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=83>)

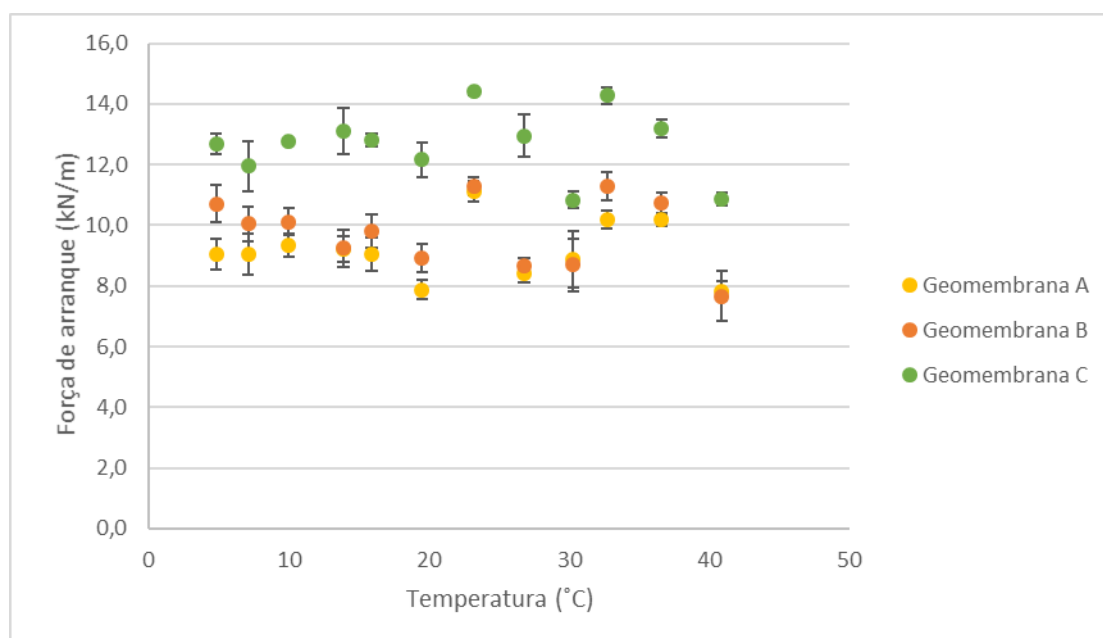
A  $T_g$  marca a zona de transição do estado vítreo (característico de baixas temperaturas – vibração das moléculas com baixa energia) para o estado “maleável” (característico de altas temperaturas – vibração das moléculas a elevada velocidade), podendo ser representada por um valor específico ou por um intervalo de valores de temperaturas. No caso do PVC, sem aditivos, a  $T_g$  é aproximadamente 80°C. Este valor sofre alterações consoante a quantidade de plastificante utilizados na composição da geomembrana. Os plastificantes são adicionados com vista a tornar o material mais flexível. Por exemplo, para geomembranas com cerca de 30% de plastificantes na sua composição, como as tipicamente utilizadas em barragens (ver Tabela 2.2), a  $T_g$  decresce para valores compreendidos entre -20°C a -25°C (Colmanetti, 2006).

Sendo a resistência mecânica das soldaduras dependente da resistência da própria geomembrana, conforme referido pelo *Comité Française de Géosynthétiques* (2017), o facto da resistência da geomembrana ser relativamente constante acima da  $T_g$  (em consonância com a Figura 4.8) pode justificar a reduzida influência que o aumento da temperatura entre 5 e 41°C teve sobre a resistência das soldaduras. Assim, os resultados obtidos neste estudo são consistentes com a hipótese de que o impacto pouco significativo na resistência mecânica das

soldaduras com o aumento da temperatura está relacionado com estrutura amorfa das geomembranas de PVC.

#### 4.4.2 Influência da espessura na força de arranque das soldaduras

Na Figura 4.9 apresentam-se a força de arranque para geomembranas A, B e C, com espessuras de 1,5, 2,0 e 3,0 mm, respetivamente. Salienta-se que a soldadura da geomembrana C era simples, pelo que os valores obtidos para a mesma são comparados apenas com a soldadura exterior das outras amostras, por uma questão de simplicidade. Recorda-se que os resultados obtidos para as soldaduras interior e exterior das geomembranas A e B foram semelhantes.



**Figura 4.9 - Força de arranque das soldaduras das geomembranas A, B e C – Influência da espessura.**

Como era de esperar, observa-se que a espessura das geomembranas tem influência na força de arranque das soldaduras. Verifica-se que a força de arranque aumenta à medida que a espessura da geomembrana aumenta. Por exemplo, à temperatura de 19,5°C, a força de arranque das soldaduras é de 12,2 kN/m, para a geomembrana de 3,0 mm, 8,9 kN/m, para a geomembrana de 2,0 mm, e de 7,9 kN/m, para a geomembrana de 1,5 mm.

Tal como referido anteriormente, as características das soldaduras em termos de resistência mecânica dependem das características da própria geomembrana. Uma vez que o aumento da resistência mecânica da geomembrana aumenta com o aumento da espessura é de esperar maior resistência mecânica oferecida pelas soldaduras em geomembranas mais espessas.

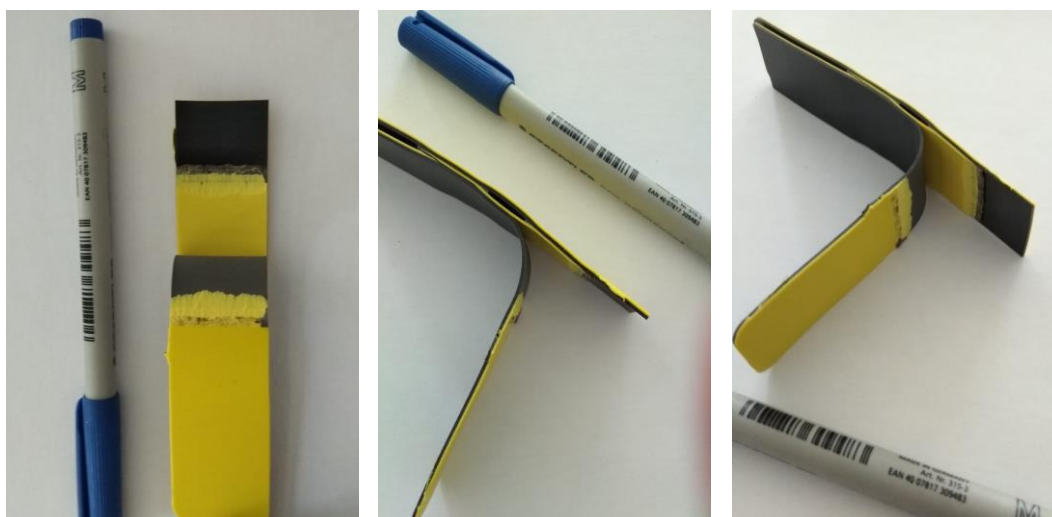
#### 4.4.3 Análise dos tipos de rotura

A análise dos tipos de rotura foi feita de acordo com a Figura 4.4, tendo-se revelado difícil a sua classificação, para todas as geomembranas.

Para a geomembrana A, observou-se que a rotura ocorre pela interface entre as duas camadas que constituem a mesma geomembrana, identificáveis com cores diferentes, amarelo e preto, tal como se pode observar na Figura 4.10, e não pela soldadura propriamente dita. Este tipo de rotura não é indicado na norma ASTM D 6392.

Na geomembrana B, observou-se que a rotura ocorre pela soldadura, sem existir descolagem. Como se pode observar na Figura 4.11, a permanência de pequenas quantidades de geomembrana na zona soldada, indica que a rotura ocorreu pelas próprias geomembranas, o que sugere que a zona menos resistente não é a soldadura.

Para a geomembrana C, constituída apenas por uma soldadura, verifica-se que as roturas ocorreram na zona da soldadura (Figura 4.12), as quais poderiam ser classificadas, de acordo com a Figura 4.4, como AD-BRK.



**Figura 4.10 – Tipo de rotura obtido para a geomembrana A.**



**Figura 4.11 - Tipo de rotura obtido para a geomembrana B.**



**Figura 4.12 - Tipo de rotura obtido para a geomembrana C.**

#### **4.4.4 Critérios de aceitação/rejeição das soldaduras**

A avaliação da qualidade das soldaduras requer que os resultados obtidos sejam posteriormente comparados com valores definidos, nas especificações de projeto, como critérios de aceitação/rejeição.

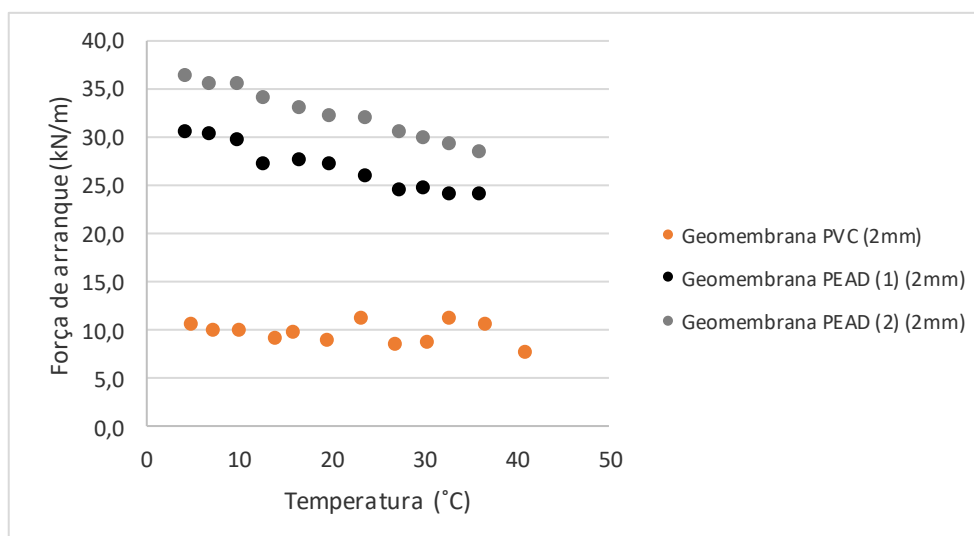
Em termos gerais, as soldaduras são aceites quando cumprem os valores especificados e rejeitadas caso contrário. Relativamente à resistência mecânica, Haxo & Kamp (1990) indicam que a resistência das soldaduras deve ser 80 a 90 % da resistência da geomembrana, sendo que no caso do PVC, esse valor é definido no projeto não correspondendo à resistência à rotura. Esta abordagem é diferente da praticada, no caso das geomembranas de PEAD, porque o valor não é referente à resistência à rotura, mas sim à cedência, tipicamente o valor indicado na ficha técnica.

Para geomembranas de PVC com espessura superior a 1 mm, as primeiras especificações desenvolvidas pelo *National Sanitation Foundation* (NSF 54) e relatadas por Haxo & Kamp (1990), propunham que a força de arranque das soldaduras deveria ser no mínimo de 2,6 kN/m. Atualmente, esse valor é ainda recomendado pela especificação mais recente, a FGI 1117 (2017).

Relativamente ao tipo de rotura, durante a realização deste trabalho, não foram encontrados, para geomembranas de PVC, critérios de aceitação/rejeição, tal como acontece, por exemplo, para geomembranas de PEAD (GRI-GM 19). Dada a dificuldade relatada na seção anterior em classificar os tipos de rotura obtidos para as geomembranas de PVC, de acordo com a norma, seria útil realizar maior investigação, no sentido de avaliar a adequabilidade do tipo de rotura, bem como a sua utilidade como critério de aceitação/rejeição, neste tipo de geomembranas.

#### **4.4.5 Comparação entre as geomembranas de PVC e PEAD**

Na Figura 4.13 comparam-se os resultados obtidos no presente estudo com os resultados obtidos por Lopes *et al.* (2006) para geomembranas de PEAD. A figura inclui apenas os resultados para a geomembrana A, soldadura exterior, de 2mm de espessura, por terem sido as condições também estudadas pelos referidos autores.



**Figura 4.13 - Força de arranque das soldaduras a diferentes temperaturas para geomembranas de PVC e PEAD (Lopes *et al.*, 2006).**

Como é possível observar na Figura 4.13, Lopes *et al.* (2006) concluíram que a força de arranque das soldaduras em geomembranas de PEAD apresentam uma relação linear com a temperatura, ou seja, à medida que aumenta a temperatura, a força de arranque das soldaduras diminui. Os autores atribuíram a diminuição da força de arranque das soldaduras com o aumento da temperatura a alterações no movimento interno das macromoléculas, que aumenta de forma a absorverem a energia a que são expostas. Esse movimento acelerado provoca o enfraquecimento das ligações intermoleculares e consequentemente diminui a resistência mecânica. Por outro lado, a redução da temperatura reduz os movimentos internos das macromoléculas dos polímeros fortalecendo as ligações intermoleculares e tornando o material mais rígido e mais resistente mecanicamente.

No caso das soldaduras em geomembranas de PVC, estudadas neste trabalho, a temperatura não influencia significativamente a força de arranque. A diferença entre os comportamentos observados neste trabalho e no trabalho relatado por Lopes *et al.* (2006) pode ser justificada pelo fato de os materiais possuírem uma estrutura molecular bastante diferente, o que, como já abordado, influencia as propriedades mecânicas do material. Se por um lado o PVC é um polímero de estrutura molecular amorfa, com módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à  $T_g$ , o PEAD, por outro lado, é um polímero de



estrutura molecular semicristalina com módulo de elasticidade decrescente para temperaturas superiores à  $T_g$  (Figura 4.8).

Para além da resistência mecânica das soldaduras, foram analisados os tipos de rotura obtidos para as diferentes temperaturas. No trabalho de Lopes *et al.* (2006) o tipo de rotura predominante foi o SE1, enquanto neste trabalho, para geomembranas de PVC, não foi evidente a classificação dos mesmos de acordo com a norma, questionando-se a sua adequabilidade para a avaliação da qualidade das soldaduras neste tipo de geomembranas.

## 4.5 Considerações finais

Neste capítulo apresentou-se o trabalho experimental desenvolvido com o intuito de avaliar a influência da temperatura sobre a resistência mecânica de soldaduras por termofusão (duplas e simples) de geomembranas de PVC com diferentes espessuras (1,5, 2,0 e 3,0 mm). Foram realizados ensaios de arranque, segundo a norma ASTM D 6392, considerando 12 temperaturas distintas, compreendidas entre 5°C e 41°C.

Apresentaram-se os materiais e os métodos de ensaio utilizados na sua realização bem como os resultados obtidos.

Os resultados foram analisados em termos de resistência ao arranque e tipo de rotura.

Relativamente à resistência ao arranque, verificou-se que a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras (simples e duplas por termofusão) foi reduzida, uma vez que os valores obtidos para diferentes temperaturas foram relativamente constantes. A justificação para a reduzida variação nos valores obtidos parece estar relacionada com a estrutura molecular amorfa do PVC, o qual apresenta um módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à  $T_g$ .

A influência da espessura na força de arranque das soldaduras foi também avaliada, constatando-se que quanto maior a espessura de geomembranas utilizada maior a resistência das soldaduras.

Relativamente ao tipo de rotura, foi difícil a sua classificação com base na norma ASTM D 6392, especialmente no caso das geomembranas A e B, o que levanta questões relativamente à utilidade da inclusão do tipo de rotura nos critérios de aceitação/rejeição, no caso de geomembranas de PVC.

Neste capítulo foram também abordados os critérios de aceitação/rejeição das soldaduras, os quais servem de comparação para os resultados obtidos, no sentido de avaliar a qualidade das soldaduras.

Os resultados obtidos neste estudo foram comparados com resultados relatados para geomembranas de PEAD, constatando-se diferenças notórias entre a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras dos dois tipos de geomembranas. Se no caso de soldaduras em geomembranas de PVC a influência da temperatura se revelou pouco significativa, no caso de soldaduras em geomembranas de PEAD a força de arranque diminui com o aumento da temperatura. As diferenças de comportamento da força de arranque das soldaduras em geomembranas de PVC e PEAD em função da temperatura foram atribuídas às diferenças existentes na estrutura molecular dos dois materiais.

## Conclusões

### 5.1 Principais conclusões

Esta dissertação centrou-se na aplicação de geomembranas em barragens, tendo como principal objetivo avaliar a influência da temperatura ambiente na resistência mecânica das soldaduras simples e duplas por termofusão, de geomembranas de PVC com diferentes espessuras (1,5, 2,0 e 3,0 mm). Este aspeto é importante porque, por vezes, em campo, não é possível assegurar a realização dos ensaios de resistência mecânica de controlo de qualidade das soldaduras à temperatura normalizada, levantando questões sobre a aceitação/rejeição das mesmas. Outro objetivo deste trabalho passou pela compilação dos principais desenvolvimentos sobre a aplicação de geomembranas em barragens, com vista a estudar o estado atual do conhecimento sobre a aplicação destes materiais e identificar os principais desafios na sua utilização.

Para o cumprimento do primeiro objetivo, foram realizados ensaios de arranque, segundo a norma ASTM D 6392, considerando 12 temperaturas distintas, compreendidas entre 5°C e 41°C. Os materiais e os métodos de ensaio utilizados foram apresentados, assim como os resultados obtidos, os quais foram analisados em termos de resistência ao arranque e tipo de rotura.

Relativamente à resistência ao arranque, verificou-se que a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras, simples e duplas por termofusão, é reduzida, uma vez que os valores obtidos para diferentes temperaturas foram relativamente constantes. A justificação para a reduzida variação nos valores obtidos reside na estrutura molecular amorfa do PVC, o qual apresenta um módulo de elasticidade relativamente constante para temperaturas superiores à temperatura de transição vítrea, na ordem dos -20°C a -25°C, para este tipo de geomembranas.

A influência da espessura na força de arranque das soldaduras foi também avaliada, constatando-se que quanto maior a espessura de geomembranas utilizada maior a resistência das soldaduras.

Relativamente ao tipo de rotura, foi difícil a sua classificação com base na norma ASTM D 6392, especialmente no caso das geomembranas A e B, o que levanta questões relativamente à utilidade da inclusão do tipo de rotura nos critérios de aceitação/rejeição, no caso de geomembranas de PVC.

Os resultados obtidos foram, também, comparados com resultados relatados para geomembranas de PEAD, constatando-se diferenças notórias entre a influência da temperatura na força de arranque das soldaduras dos dois tipos de geomembranas. No caso das soldaduras de geomembranas de PVC, a influência da temperatura revelou-se pouco significativa, contrariamente ao que acontece nas soldaduras de geomembranas de PEAD. As diferenças de comportamento da força de arranque das soldaduras em geomembranas de PVC e PEAD em função da temperatura parecem estar relacionadas com as diferenças na estrutura molecular dos dois materiais.

No que se refere ao segundo objetivo deste trabalho, realizou-se uma compilação dos principais desenvolvimentos sobre a durabilidade, as fugas e os principais requisitos de instalação, como as soldaduras, as dobras e as condições da superfície de apoio.

Verificou-se que a durabilidade de uma geomembrana é afetada pelas solicitações impostas ao material durante o seu período de utilização, bem como pela sua composição e processo de fabrico pelo que é importante avaliar o tempo de vida útil de uma geomembrana. A previsão da vida útil de uma geomembrana tem sido realizada com base em resultados obtidos em ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas *in situ* ou amostras envelhecidas de forma acelerada. Para geomembranas de PVC, o tempo de vida útil estimado é superior a 50 anos.

Os desenvolvimentos sobre a ocorrência de fugas permitiram constatar que a frequente implementação de atividades de garantia de qualidade de construção contribuem para a redução do número de danos nas geomembranas, minimizando o fluxo através dos mesmos. Verificou-se, também, a existência de várias ferramentas para o cálculo do fluxo através de orifícios nas geomembranas, destacando-se, uma equação empírica especialmente desenvolvida para condições representativas de uma barragem.

No que diz respeito aos principais requisitos de instalação, constatou-se que a qualidade das soldaduras duplas em geomembranas de PVC em termos de resistência mecânica pode ser

controlada através do ensaio de pressão de ar, realizado segundo a norma ASTM D 7177, em substituição do ensaio destrutivo de arranque. A questão da avaliação da qualidade das soldaduras em geomembranas de PVC carece ainda de investigação.

Quanto às dobras, verificou-se que o coeficiente de expansibilidade térmica e o módulo de elasticidade da geomembrana são as propriedades do material com maior influência na sua formação. O tipo de geomembrana, a cor e a textura são também determinantes na formação de dobras. As geomembranas de PVC apresentam dobras bastante mais pequenas e espaçadas entre si que as geomembranas de PEAD. A cor tem uma influência reduzida na altura das dobras, mas bastante elevada no seu espaçamento, verificando-se o dobro do espaçamento para geomembranas de cor branca relativamente a geomembranas de cor negra. As geomembranas texturadas apresentam dobras menores e com menor espaçamento do que geomembranas lisas.

Por último, verificou-se que a superfície de apoio deve ser plana, estável, homogénea, firme, sem depressões, livre de qualquer presença de água, lamas, vegetação, detritos ou outros materiais nocivos, e que a dimensão máxima dos agregados deve ser inferior a 10 mm. No caso de geomembranas de PVC reforçadas com geotêxtil (geocompósitos), as dimensões dos agregados presentes na superfície poderão ser superiores, embora não excedendo os 100 mm.

## **5.2 Trabalhos futuros**

Como trabalhos futuros surge-se a realização de ensaios de corte às soldaduras, utilizando equipamento de tração adequado, de forma a completar a avaliação da influência da temperatura na resistência mecânica das soldaduras, com base na norma ASTM D 6392.

Outra sugestão consiste na realização do trabalho experimental numa gama mais alargada, que inclua diferentes tipos de geomembranas, com várias espessuras e tipos de soldadura, com vista a contribuir para o desenvolvimento de critérios de aceitação/rejeição mais robustos. Estes critérios deverão ter em conta a definição de valores mínimos de resistência mecânica, bem como a verificação da utilidade do tipo de rotura como resultado relevante na avaliação da qualidade de uma soldadura de PVC.

O estudo do comportamento, ao longo do tempo, das soldaduras em geomembranas de PVC, sujeitas às solicitações climáticas características de Portugal seria, também, importante de realizar.

## Referências Bibliográficas

- Aguiar, E. & Blanco, M. (1995). Experience in connection with the performance of plasticized polyvinyl chloride sheeting in Tenerife basin sealing. Proc. Symposium ICOLD on Research and Development in the Field of Dams, Crans-Montana, Suiss.
- ASTM D 6392. Standard Test Method for Determining the Integrity of Nonreinforced Geomembrane Seams Produced Using Thermo-Fusion Methods, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania, USA.
- ASTM D 7177. Standard Specification for Air Channel Evaluation of Polyvinyl Chloride (PVC) Dual Track Seamed Geomembranes, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM D 7408. Standard Specification for Non-Reinforced PVC (Polyvinyl Chloride Air Channel Evaluation of Polyvinyl Chloride Geomembrane Seams, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Barroso, M. & Lopes, M. d. G. (2008). Plano de Garantia de Qualidade da Instalação dos Geossintéticos em Aterros de Resíduos. Informações Científicas e Técnicas. 1ªed.Lisboa. LNEC.
- Barroso, M., Lopes, M.G., Dores, R. & Coimbra, L. (2012). Integrity of HDPE Geomembranes: Effect of Weather Exposure on the Thecnical Properties of Seams. GeoAmericas, Lima, Perú.
- Barroso, M., Touze-Foltz, N., von Maubeuge, K. & Pierson, P. (2006). Laboratory investigation of flow rate through composite liners consisting of a geomembrane, a GCL and a soil liner. Geotextiles and Geomembranes 24, No. 3, 139–155.
- Blanco, M. & Aguiar, E. (1993). Comportamiento de láminas de poli (cloruro de vinilo) plastificado, utilizadas en la impermeabilización de balsas en el norte de Tenerife. Ing. Civil, 88, No. 2, 5–20.
- Blanco, M., Castillo, F., García, F., Mateo, B., Solera, R., García, C., de Cea, J. C. & García-Wolfrum, S. (2012). Monitoring of synthetic geomembranes used for waterproofing in hydraulic works. In Eurogeo5, Vol. 2: 64–69 (Electronic Proceedings) Vol. 1: 274–279 (Printed Volumes).
- Blanco, M., Castillo, F., García, F. & Soriano, J. (2010). Las geomembranas sintéticas en la rehabilitación y mantenimiento de paramentos de presas. Dam Maintenance and Rehabilitation II, London, UK, pp. 335–341.
- Blanco, M., Crespo, M. A., Leiro, A. & Mateo, B. (2013). Relaciónentre la durabilidad de geomembranas de PVC-P y el tipo de plastificante utilizado como aditivo. Proc. XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congresode Control de Calidad de la Construcción CONPAT-Colombia, Cartagena de Indias. ALCONPAT, Cartagena de Indias, Colombia vol. P, pp. 583–592.

- Blanco, M., Rico, G., Pargada, L., Castillo, F. & Aguiar, E. (2008). Estudio de plastificantes utilizados en geomembranas de PVC-P empleadas en impermeabilización de obras hidráulicas. *Rev. Plast. Modernos*, 96, No. 629, 386–391.
- Blanco, M., Solera, R., Giroud, J. P., Pérez Sánchez, M., Redón Santafé, M., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B. & Zapata Raboso, F. A. (2016). Characteristics of six PVC-P geomembranes installed in reservoirs in Spanish Mediterranean Basin. *Eurogeo6.IGS-Turkey, Ljubljana, Slovenia*, pp. 623–631.
- Blanco, M., Soriano, J., Aguiar, E. & Zaragoza, G. (2002). Análisis microscópico de geomembranas sintéticas utilizadas en la impermeabilización de embalses. *Ing. Civil*, 127, No. 1, 51–59.
- Blanco, M., Touze-Foltz, N., Pérez Sánchez, M., Redon-Santafe, M., Sánchez Romero, F. J., Torregrosa Soler, J. B. and Zapata Raboso, F. A. (2018). Durability of reinforced PVC-P geomembranes installed in reservoirs in eastern Spain. *Geosynthetics International*, 25, No. 1, 85–97.
- Blanco, M. & Zaragoza, G. (2003). El Odiel-Perejil como un caso pionero en la utilización de una geomembrana sintética en la impermeabilización de presas. *Ing. Civil*, 132, No. 1, 33–40.
- Caldeira, L., & Ramos, J. M. (2001). Tipos de barragens. Escolha de soluções. Curso de Exploração e Segurança de Barragens. (Cap. 1.2, pp. 11-72). Lisboa: INAG.
- Cazzuffi, D. (1987). The use of geomembranes in Italian dams. *International Water Power & Dams Construction*, 39, No. 3, 17–21.
- Cazzuffi, D. (1996). Réhabilitation de barrages en maçonnerie ou en béton à l'aide de geomembranes: l'expérience italienne. *Comptes rendus du colloque technique "Les geotextiles et les geomembranes dans les barrages"*, Paris, p. 14, 1-12.
- Cazzuffi, D. (2014). Long-time performance of exposed geomembranes used for the upstream face rehabilitation of dams in Northern Italy. 10th International Conference on Geosynthetics, IGS (Germany) – German Geotechnical Society, Berlin, Germany, pp. 100–112.
- Cazzuffi, D. A., Giroud, J. P., Scuero, A. & Vaschetti, G. (2010). Geosynthetic barriers systems for dams. 9th International conference on geosynthetics, Brazil.
- Carneiro, J., 2009. Durabilidade de materiais geossintéticos em estruturas de carácter ambiental - A importância da incorporação de aditivos químicos. Tese de Doutoramento em Engenharia do Ambiente na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Chappel, M. J., Brachman, R. W. I., Take, W. A. & Rowe, R. K. (2007). Development of a low-altitude aerial photogrammetry technique to quantify geomembrane wrinkles. *Proceedings of Geosynthetics2007*, Washington, DC, USA, pp. 293–300.
- Chappel, M.J., Rowe, R.K., Brachman, R.W.I., Take, W.A. (2012). A comparison of geomembrane wrinkles for nine field cases. *Geosynth. Int.* 19 (6), 453 e 469.

- Chappel, M.J., Take, W.A., Brachman, R.W.I., and Rowe, R.K. (2008). A Case Study of Wrinkles in a Textured HDPE Geomembrane on a Slope. The First Pan American Geosynthetics Conference & Exhibition 2-5 March 2008, Cancun, Mexico.
- Colmanetti, J. P. (2006). Estudos sobre a aplicação de geomembranas na impermeabilização da face de montante de barragens de enrocamento. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasil.
- Comité Français des Géosynthétiques (2017). General recommendations for the use of geomembranes in barrier systems.
- EN ISO 10318:2005 – Geosynthetics – Terms and definitions.
- Figueira, J. (2014). O projeto, construção e desempenho de barragens de aterro com geossintéticos. Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- FGI (Fabricated Geomembrane Institute) (2004). PVC Geomembrane Material Specification 1104, University of Illinois, Urbana, IL.
- FGI (Fabricated Geomembrane Institute) (2010). Subgrade Requirements for Fabricated Geomembranes, University of Illinois, Urbana, IL.
- Giroud, J.P. (1984). “Geomembrane Liners: Accidents and Preventive Measures”, Proceedings of the Second International Symposium on Plastic and Rubber Waterproofing in Civil Engineering, Vol. 1, Session 4, Liege, Belgium, June 1984, pp. 4.2.1-4.2.6.
- Giroud, J. P. (2005). Quantification of geosynthetic behavior. Geosynthetics International, Special Issue on the Giroud Lectures, 12, No. 1, 2–27.
- Giroud, J.P. (2016). Leakage control using geomembrane liners. Fifth Victor de Mello Lecture, Porto, Portugal.
- Giroud, J. P. & Morel, N. (1992). Analysis of geomembrane wrinkles. Geotextiles and Geomembranes, 11, No. 3, 255–276.
- Giroud, J.P., Tisseau, B., Soderman, K.L., & Beech, J.F. (1995). “Analysis of Strain Concentrations Next to Geomembrane Seams”, Geosynthetics International, Special Issue on Design of Geomembrane Applications, Vol. 2, No. 6, pp. 1049-1097.
- Greenwood, J. H., Schroeder, H. F. & Voskamp, W. (2012). Durability of Geosynthetics, CUR committee C187.
- GRI-GM13. Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes. Revision 14: January 6, 2016. Geosynthetic Research Institute, Folsom, Pennsylvania, USA.
- <http://geosynthetic-institute.org/grispecs/gm13.pdf> (Acesso em 30/08/2018).



- GRI-GM19. Standard Specification for Seam Strength and Related Properties of Thermally Bonded Polyolefin Geomembranes. Revision 6: October 3, 2011. Geosynthetic Research Institute, Folsom, Pennsylvania, USA.
- <http://geosynthetic-institute.org/grispecs/gm19.pdf> (Acesso em 30/08/2018).
- GSI White Paper #27 (2013). The Intimate Contact Issue of Field Placed Geomembranes with respect to Wave (or Wrinkle) Management. Geosynthetic Institute, USA.
- <http://geosynthetic-institute.org/papers/paper27.pdf> (Acesso em 30/08/2018).
- Haxo, H. e Kamp, L. (1990). Destructive Testing of Geomembrane Seams: Shear and Peel Testing of Seam Strength. *Geotextiles and Geomembranes* No.9, pp. 369-395.
- Hsuan, Y.G. e Koerner, R.K. (1998). Antioxidant Depletion Lifetime in High Density Polyethylene Geomembranes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE 124 (6), pp. 532-541.
- Hsuan, Y. G., Schröder, H. F., Rowe, R. K., Müller, W., Greenwood, J. H., Cazzuffi, D. & Koerner, R. M. (2008). Long-term performance and lifetime prediction of geosynthetics. *Proc. 4<sup>th</sup> European Conf.*, Edinburgh, Scotland, UK Chapter, International Geosynthetics Society, London, UK, pp. 512–521.
- ICOLD (2010). Geomembrane sealing systems for dams. Bulletin 135 of the International Commission on Large Dams, Paris, France.
- Jansen, J.A. (2016). *Plastics – It's All About Molecular Structure*. Consultant's Corner, The Madison Group.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geo synthetics*. In: *Designing with geo synthetics*. New Jersey, Upper Saddle River: PEARSON EDUCATION. I.
- Koerner, R. M. & Hsuan, Y. G. (2003). Lifetime prediction of polymeric geomembranes used in new dam construction and dam rehabilitation. Pennsylvania
- Koerner, R. M., Hsuan, Y. G. and Koerner, G. R. (2017). Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*, 24, No. 2, 198–212.
- Koerner, R. M. & Koerner, G. R. (2014). Monitoring in-situ conditions at landfills for the purpose of evaluating long-term geomembrane performance. *Proc. 10th IGS*, German Geotechnical Society, Berlin, Germany.
- Lopes, G., Barroso, M. & Costa, C. (2006). Acceptance criteria for HDPE geomembranes double hot wedge seams: influence of the temperature on peel strength. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Lopes, M. P. & Lopes, M. d. L. (2010). *A Durabilidade dos Geossintéticos*. 1<sup>a</sup> ed. Porto: Feup edições.

- Lüders, G. (2000). Quality assurance in hot wedge welding of HDPE geomembranes. In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> European Geosynthetics Conference. Pàtron Editore, Bologna, Italy, pp. 591-596.
- Malpass, D. B. (2010). Introduction to Industrial Polyethylene - Properties, Catalysts, Processes. Wiley, Massachussets.
- MARM (Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino). (2010). Manual de diseño, construcción, explotación y mantenimiento de balsas, CEDEX, MARM, Madrid, Spain.
- Melo, P.G. (2016). Slides da unidade curricular Obras Geotécnicas da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.
- Müller, W.W. (2007). HDPE Geomembranes in geotechnics. Springer, Berlin, Germany.
- Müller, W.W. & Wöhlecke, A. (2017). Zero leakage? Landfill liner and capping systems in Germany. Environmental Geotechnics. ICE Publishing.
- Neves, E.M., Caldeira, L. & Lopes, M.G. (2015). Projeto, Construção e Observação de pequenas barragens de aterro. 1ªed. Lisboa: IST Press, Cap.6.
- Nosko, V. & Touze-Foltz, N. (2000). "Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer", Proceedings of EuroGeo 2, Vol. 2, Bologna, Italy, pp. 557-560.
- Noval, A. M. (2015). Estudio del comportamiento de tres geomembranas de EPDM, PVC-P y PEAD a lo largo del tiempo, Tesis doctoral, Universidad Carlos III, Madrid, Spain.
- Peggs I. (1990). Detection and Investigation of Leaks in Geomembrane Liners, Geosynthetics World, vol 1, issue 2., winter, pp 7-14.
- Peggs, I. (1994). Interview Geosynthetics World, Linz, Austria, April 1994, pp 7-8, Vol. 4, No. 4.
- Peggs, I. (1996). A Reassessment of HDPE Geomembrane Seam Specifications", Proceedings of Geosynthetics: Applications, Design and Construction, Balkema, Rotterdam, pp 693-696.
- Peggs, I., Gassner, F., Scheirs, J., Tan, D., Arango, A. M. N. & Burkard, B. (2014). Is there a resurgence of stress cracking in HDPE geomembranes? Proceedings 10th International Geosynthetics Conference, Berlin, Germany, DGGT, Essen, Germany.
- Peggs, I. and Little, D. (1985). The Effectiveness of peel and shear tests in evaluating geomembrane seams. Proceedings of the 2nd Canadian Symposium on Geotextiles and Geomembranes, Edmonton, Alberta (1985), pp. 141-146.
- Ping Yang, Xue, S., Song, L. & Zhu, X. (2017). Numerical simulation of geomembrane wrinkle formation. Geotextiles and Geomembranes No.45, pp. 697-701.
- Reis, A. (2016). Geossintéticos em vias de comunicação: Influência das condições climáticas. Trabalho de Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização de Vias de Comunicação e Transportes. ISEL, Lisboa.

- Rentz, A.K., Brachman, R.W.I., Take, W.A., Rowe, R.K. (2017). Comparison of wrinkles in white and black HDPE geomembranes. *J. Geotechnical Geoenvironmental Eng.* 143 (8), 04017033-1-8.
- Rollin A.L., Marcotte M., Jacquelin T. and Chaput L., (1999). Leak Location in Exposed Geomembrane Liners Using an Electrical Leak Detection Technique, *Proceedings of Geosynthetics'99*, Boston, pp 615-626.
- Rowe, R.K. (1998). Geosynthetics and the minimization of contaminant migration through barrier systems beneath solid waste, Keynote Lecture. *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol.1, Atlanta, March. Industrial Fabrics Association International, St. Paul, MN, pp. 27–103.
- Rowe R.K. (2005). Long-term performance of contaminant barrier systems. *Géotechnique* **55**(9): 631-678 Crossref, ISI, Google Scholar.
- Rowe, R.K., Chappel, M.J., Brachman, R.W.I., Take, W.A. (2012). Field study of wrinkles in a geomembrane at a composite liner test site. *Can. Geotechnical J.* 49 (10), 1196 e 1211.
- Rowe, R.K.; Rimal, S. & Sangam, H.P. (2009). Ageing of HDPE Geomembrane Exposed to Air, Water and Leachate at Different Temperatures, *Geotextiles and Geomembranes*, 27, pp. 137-151.
- Rowe, R. K. & Sangam H. P. (2002). Durability of HDPE Geomembranes, *Geotextile and Geomembranes*, No. 20, pp.77-95.
- Rowe, R.K.; Sangam, H.P. & Lake, C.B. (2003). Evaluation of an HDPE Geomembrane after 14 Years as a Leachate Lagoon Liner. *Canadian Geotechnical Journal*, No. 40, pp. 536-550.
- Sangam, H, P. & Rowe, R. K. (2002). Permeation of Organic Pollutants through a 14 Years Old Field-Exhumed HDPE Geomembrane, *Proceedings of 7th International Conference on Geosynthetics*, Nice, France, pp.531-534.
- Scheirs, J. (2009). *A Guide to Polymeric Geomembranes: A Practical Approach*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK.
- Stark, T. D., Choi, H. & Thomas, R. W. (2004). Low temperature air channel testing of thermally bonded PVC seams. *Geosynthetics International*, 11, No. 6, 481–490.
- Stark, T. D. & Pazmino, L. F. (2011). High-temperature air channel testing of thermally bonded PVC geomembrane seams. *Geosynthetics International* No. 2, 84–89.
- Take, W. A., Chappel, M. J., Brachman, R. W. I. & Rowe, R. K. (2007). Quantifying geomembrane wrinkles using aerial photography and digital image processing. *Geosynthetics International*, No. 4, 219–227.
- Thomas, R. W. & Stark, T. D. (2003). Reduction of destructive tests for PVC seams. *Geotechnical Fabrics Report*, IFAI, pp. 26–29 March.

- Thomas, R. W., Stark, T. D. & Choi, H. (2003). Air channel testing of thermally bonded PVC geomembrane seams. *Geosynthetics International*, 10, No. 2, 56–69.
- Vertematti, J. C. (2004). *Manual Brasileiro de Geossintéticos*. 6 ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- Zhang, L., Bouazza, A., Rowe, R. K. and Scheirs, J. (2017). Effect of welding parameters on properties of HDPE geomembrane seams. *Geosynthetics International*, 24, No. 4, 408–418.
- Zornberg, J.G., and Weber, C.T. (2003). “Geosynthetics Research Needs for Hydraulic Structures” *Proceedings of the Seventeenth Geosynthetic Research Institute Conference, Hot Topics in Geosynthetics IV, Las Vegas, Nevada, December 15-16*, pp. 183-197.
- Weber, C.T., and Zornberg, J.G. (2007). “Leakage through Geosynthetic Dam Lining Systems.” *Dam Safety 2007 Conference, ASDSO, Austin, Texas, 9-13 September*, pp. 1-9 (CD-ROM).

### **Sítios da Internet**

- <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Classificacao%20dos%20Geossinteticos.pdf> (Acesso em 27/03/2018)
- <http://www.spgeotecnia.pt/upload/docs/Documentos%20IGS/FOLHETOS/Funcoes%20dos%20Geossint%C3%A9ticos.pdf> (Acesso em 27/03/2018)
- <https://www.ntcbrasil.com.br/geotextil-tecido/> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://ambitela.pt/produtos/geogrelha-de-reforco> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://ambitela.pt/produtos/georede> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://ambitela.pt/produtos/geocomposto-drenante> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://ambitela.pt/produtos/geomembranas> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://ecosalix.pt/produto/geocelulas/> (Acesso em 05/04/2018)
- <http://quintadoribeirinho.pt/en/barragem-da-pracana/> (Acesso a 11/04/2018)
- <http://bomdia.eu/quem-quer-um-terreno-na-barragem-da-caniada/> (Acesso em 11/04/2018)
- <http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2011/08/barragem-da-aguieira.html> (Acesso a 11/04/2018)
- [http://www.baixotamega.pt/pages/441/?geo\\_article\\_id=1147](http://www.baixotamega.pt/pages/441/?geo_article_id=1147) (Acesso a 11/04/2018)
- <http://www.edia.pt/folder/imprensa/ficheiro/1856.jpg> (Acesso a 13/04/2018)
- <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=83> (Acesso a 10/08/2018)



## Anexos

### Anexo A1 – Geossintéticos

#### Anexo A1.1 - Tipos de geossintéticos

Segundo a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS – Portugal, 2018), um geossintético consiste, de uma forma geral, num material polimérico (sintético ou natural) plano, usado em contato com materiais naturais (solos ou rochas) ou com qualquer outro material geotécnico, em aplicações de Engenharia Civil.

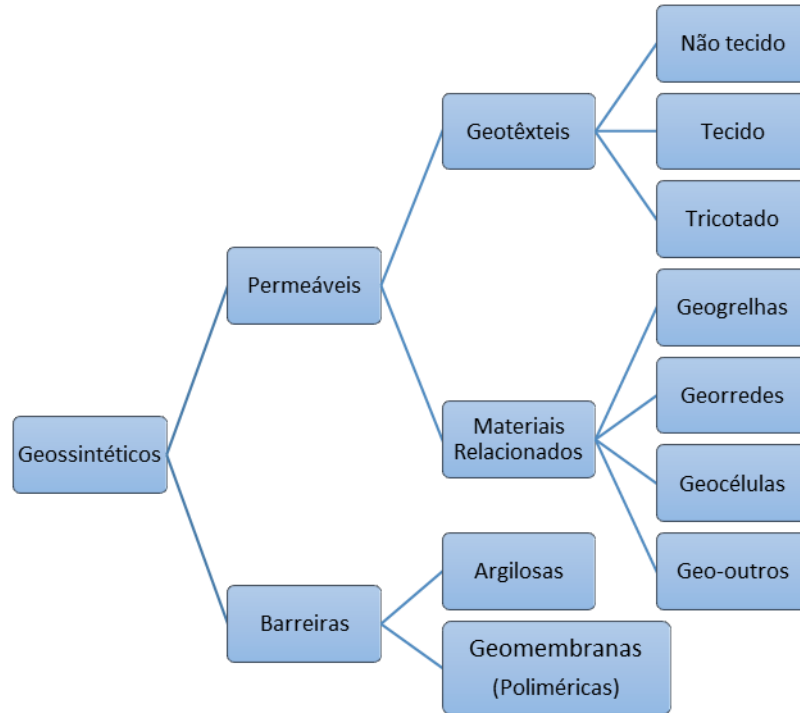
As matérias-primas usadas para o fabrico de geossintéticos podem ser naturais (lã, algodão, seda, entre outros) ou sintéticas.

Os materiais geossintéticos, ao longo dos últimos anos, têm sido muito aplicados nas mais diversas obras de construção civil, tais como, aeroportos, aterros, rodovias, ferrovias, barragens, etc.

As principais razões do sucesso no uso dos geossintéticos incluem vantagens **técnicas**, como a rapidez e simplicidade de aplicação, bem como a existência de uma grande gama de produtos para os mais variados fins; **económicas**, como o baixo custo; e **ambientais**, como o baixo impacto ambiental. Estas constituem os geossintéticos como uma excelente alternativa aos materiais de construção tradicionais (Carneiro, 2009).

Existem diferentes tipos de geossintéticos que são classificados, de acordo com a norma NP EN ISO 10318 (2005). Estes podem ser classificados em produtos permeáveis e barreiras, como se pode observar na Figura A1.1. Os produtos permeáveis incluem os geotêxteis e os materiais relacionados como as georredes, as geogrelhas, as geocélulas, entre outros. Por outro

lado, as barreiras dividem-se em argilosas e poliméricas, sendo as últimas mais conhecidas por geomembranas. Importa referir que a associação de diferentes geossintéticos dá origem aos geocompósitos.



**Figura A1.1 - Classificação dos geossintéticos segundo a EN ISO 10318.**

Apresenta-se, de seguida uma breve descrição dos principais tipos de geossintéticos, de acordo com a norma NP EN 10318 (2005).

**Geotêxteis:** são materiais poliméricos planos (Figura A1.2) e permeáveis, podendo ser divididos, de acordo com o processo de fabrico, em tecidos, não tecidos ou tricotados. São usados em diversas aplicações, desempenhando sempre, pelo menos, uma das seguintes funções: proteção, reforço, separação, filtragem ou drenagem.



**Figura A1.2 – Exemplo de Geotêxtil tecido** (<https://www.ntcbrasil.com.br/geotextil-tecido/>).

**Geomembranas:** são materiais poliméricos planos de superfície lisa (Figura A1.3) ou rugosa. A principal função das geomembranas é a contenção de líquidos ou gases. Este tipo de geossintético, perfila-se como sendo o principal objeto deste trabalho.



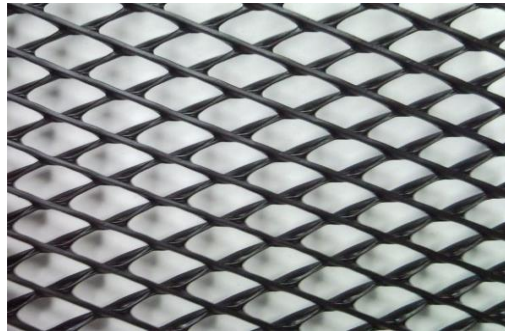
**Figura A1.3 – Exemplo de Geomembrana de PEAD** (<http://ambitela.pt/produtos/geomembranas>).

**Geogrelhas:** são materiais poliméricos planos com uma estrutura aberta de elementos ligados e cruzados entre si (Figura A1.4). As geogrelhas desempenham quase sempre funções de reforço.



**Figura A1.4 – Exemplo de Geogrelha** (<http://ambitela.pt/produtos/geogrelha-de-reforco>).

**Georredes:** são materiais poliméricos planos com uma malha densa (Figura A1.5) e regular (possuem uma estrutura aberta como as geogrelhas). A diferença entre as georredes e as geogrelhas tem a ver com a função que desempenham. As georredes são normalmente usadas para funções de drenagem de líquidos ou de gases.



**Figura A1.5 – Exemplo de Georrede (<http://ambitela.pt/produtos/georede>).**

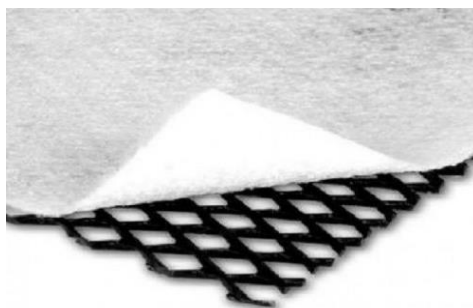
**Geocélulas:** são redes tridimensionais, relativamente espessas, construídas a partir de tiras poliméricas ligadas de modo a formar células interligadas que são preenchidas com solo (Figura A1.6), ou com betão (IGS – Portugal, 2018). As geocélulas desempenham funções de reforço.



**Figura A1.6 – Exemplo de Geocélulas (<http://ecosalix.pt/produto/geocelulas/>).**

**Geocompósitos:** são formados pela associação de diferentes materiais (Figura A1.7), em que, pelo menos, um deles é um geossintético. A combinação de inúmeros materiais pode dar origem a uma grande variedade de geocompósitos, utilizados nas mais diversas aplicações e desempenhando funções de acordo com a estrutura dos materiais envolvidos (Carneiro, 2009). Podem assim, existir diferentes tipos de geocompósitos, como por exemplo, geocompósitos drenantes, geocompósitos de reforço ou geocompósitos argilosos.





**Figura A1.7 – Exemplo de Geocompósito drenante** (<http://ambitela.pt/produtos/geocomposto-drenante>).

## **Anexo A1.2 - Geossintéticos em barragens**

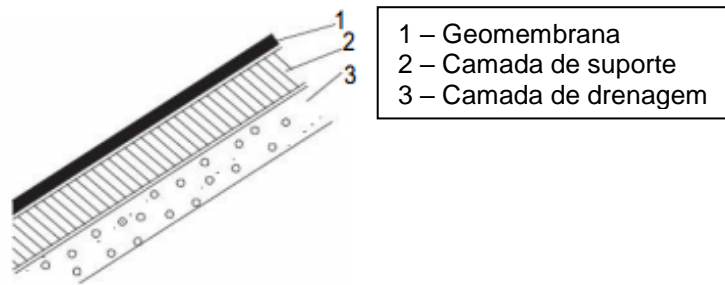
O grande desenvolvimento na área dos geossintéticos possibilitou a sua utilização, com sucesso, em diversas áreas da engenharia. A impermeabilização de barragens com recurso a estes materiais tem aumentado ao longo do tempo, tanto em construção nova como em reabilitação. Atualmente, a solução passa pelo recurso a sistemas de impermeabilização com geomembranas (SIGM), que consistem na utilização destas em conjunto com outros geossintéticos cujos objetivos passam por garantir um bom funcionamento do sistema, assegurando a proteção das geomembranas, bem como uma drenagem e ventilação adequadas. Para tal são utilizados geotêxteis e por vezes também georredes.

A constituição de um SIGM depende muito das características da barragem em que este é aplicado, das solicitações impostas e do tipo de sistema utilizado. Assim, de forma abrangente, um SIGM deve conter as seguintes camadas na sua constituição:

- **Camada de impermeabilização:** constituída por geomembranas, unidas de modo a formar um plano contínuo;
- **Camada de suporte:** constituída por geotêxteis, localizados sob as geomembranas, como forma de proteção contra o punçoamento. Existe a possibilidade de utilização de um geocompósito (geomembrana e geotêxtil);
- **Camada de proteção:** constituída por geotêxteis, localizados sobre as geomembranas, apenas em sistemas cobertos, como forma de proteção aos materiais utilizados como cobertura;
- **Camada de drenagem:** constituída por georredes ou geotêxteis, cuja função passa pela drenagem da água, atrás da camada impermeável, posteriormente

recolhida, impedindo a instabilidade do sistema pelo equilíbrio das pressões nessa zona.

Na Figura A1.8, observa-se a constituição genérica de um sistema exposto numa barragem de aterro.



**Figura A1.8 - Constituição genérica de um sistema exposto numa barragem de aterro (Adaptado de ICOLD, 2010).**

A utilização dos SIGM prevê a integração de vários geossintéticos em simultâneo, sendo que no caso das barragens se utilizam, as geomembranas, os geotêxteis e as georredes.

Os SIGM apresentam vantagens em relação aos sistemas de impermeabilização tradicionais (núcleos de argila, cortinas de betão armado, entre outros). Desde logo, o custo destes sistemas pode ser bem mais reduzido.

Os SIGM estão menos dependentes da qualidade da sua construção, fazendo com que a sua reduzida permeabilidade e durabilidade sejam menos afetados pela experiência e competência dos intervenientes na sua instalação, exigindo, no entanto, mão-de-obra especializada e cuidados especiais de instalação.

O tempo total de construção das barragens e as suas condicionantes podem ser reduzidos com estes sistemas, devido à possibilidade de a instalação ser executada em função do planeamento da construção, uma vez que a sua esta é muito pouco afetada pelas condições climáticas, o que não acontece em sistemas tradicionais (Figueira, 2014).

## Anexo A1.3 - Funções dos geossintéticos

Os geossintéticos distinguem-se pelo desempenho de uma ou mais funções em simultâneo. Destas destacam-se: drenagem, filtração, proteção, reforço, separação e controlo de erosão superficial e barreira de fluidos.

Apresenta-se, de seguida, com base na norma NP EN 10318 (2005), uma breve descrição das funções dos geossintéticos.

**Drenagem:** consiste na recolha e no transporte de líquidos ao longo do plano de um geossintético. Este deve permitir a circulação de líquidos, através de aberturas com dimensões tais que impeçam a passagem de partículas sólidas para o interior dos drenos.

**Filtração:** consiste no movimento de líquidos através dos geossintéticos com retenção simultânea do solo no sentido do fluxo. Os geossintéticos devem ter uma estrutura tal, que permita a passagem dos líquidos e, ao mesmo tempo, impeça a passagem de partículas sólidas. Estes devem, ainda, possuir uma boa flexibilidade de forma a existir um bom ajuste com o solo envolvente.

**Proteção:** consiste no recurso a um geossintético de forma a evitar ou limitar a ocorrência de danificação de um determinado elemento ou material.

**Reforço:** consiste na instalação de geossintéticos de forma a melhorar as propriedades mecânicas de um solo ou de outro material de construção. A função de reforço é exercida essencialmente em duas situações: (1) geossintéticos colocados entre duas camadas sujeitas a pressões diferentes, a sua tensão equilibra a diferença de pressão entre essas camadas, conduzindo ao reforço global; (2) geossintéticos colocados no interior de maciços para suportar tensões de tração, aumentando a capacidade global da estrutura para resistir a esforços deste tipo. O reforço é uma função que requer dos geossintéticos propriedades mecânicas adequadas (Carneiro, 2009).

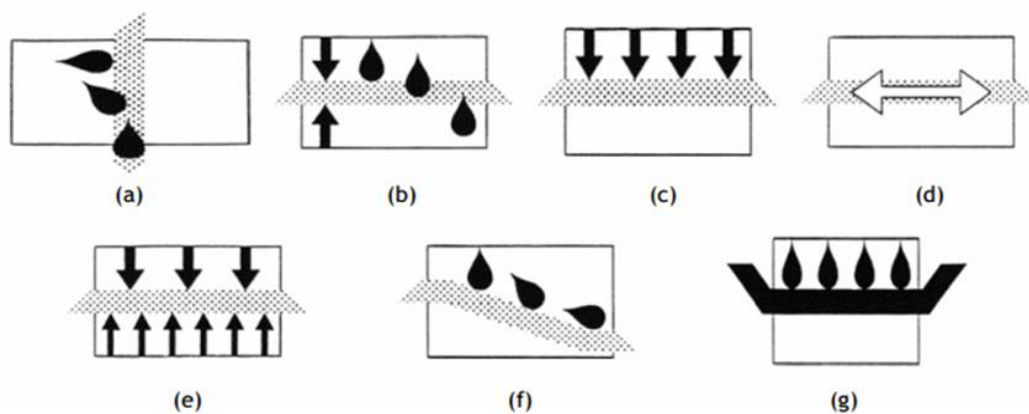
**Separação:** consiste na colocação de um geossintético entre dois materiais adjacentes com características diferentes de forma a evitar a sua mistura, que poderia comprometer a integridade e o correto funcionamento dos materiais.

**Controlo de erosão superficial:** consiste na utilização de um geossintético para evitar ou limitar os movimentos do solo ou de outras partículas à superfície de, por exemplo, um talude.

**Barreira de fluidos:** consiste no uso de um geossintético de forma a evitar ou limitar a migração de fluidos (líquidos ou gases). Esta função, exige dos geossintéticos impermeabilidade

e continuidade, devendo ainda estes ser suficientemente resistentes aos ataques químicos causados pelos fluidos.

Na Figura A1.9 podem observar-se esquemas ilustrativos das funções exercidas pelos geossintéticos e descritas anteriormente.



**Figura A1.9 - Funções dos geossintéticos (a) Drenagem; (b) Filtragem; (c) Proteção; (d) Reforço; (e) Separação; (f) Controlo da erosão superficial; (g) Barreira de fluidos (norma NP EN ISO 10318 (2005)).**

## Anexo A2 – Tipos de barragens

### Anexo A2.1 - Barragens de aterro

Segundo a ICOLD, cerca de 77% das barragens existentes são de aterro. Estas são constituídas essencialmente por solo e por enrocamento, sendo classificadas como barragens de terra, de enrocamento ou de terra enrocamento, consoante o material predominante. Os materiais são normalmente escavados ou extraídos de locais próximos.

As barragens de terra podem ser de perfil homogéneo ou de perfil zonado. As de perfil homogéneo são constituídas, essencialmente, por um material (argilas, misturas de argilas, areias argilosas, argilas arenosas, etc.) servindo toda a estrutura para o controlo da percolação. As de perfil zonado são constituídas por um núcleo de solos de características de permeabilidade adequadas e maciços estabilizadores constituídos por materiais de boa resistência (Figueira, 2014). Na Figura A2.1, observa-se a barragem de terra com perfil homogéneo do Salgueiro, enquanto a Figura A2.2, mostra a barragem de terra com perfil zonado de Alijó. As barragens de enrocamento são constituídas por material grosseiro, contendo uma quantidade muito pequena de finos, o que leva a que tenham uma grande capacidade drenante, não existindo qualquer desenvolvimento de pressões intersticiais. As barragens de terra e enrocamento apresentam, como o próprio nome indica, dois maciços diferenciados, um de terra e outro de enrocamento (Figueira, 2014). Nas Figuras A2.3 e A2.4 é possível observar a barragem de enrocamento do Pego do Altar e a barragem de terra e enrocamento de Vale do Gaio, respetivamente.



**Figura A2.1 - Barragem de perfil homogéneo do Salgueiro, Portugal (Adaptado de Melo, 2016).**

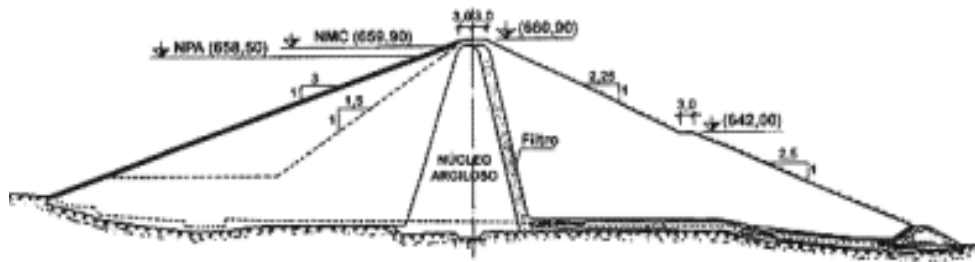


Figura A2.2 - Barragem de perfil zonado de Alijó, Portugal (Adaptado de Melo, 2016).



Figura A2.3 - Barragem de enrocamento do Pego do Altar, Portugal (Adaptado de Melo, 2016).

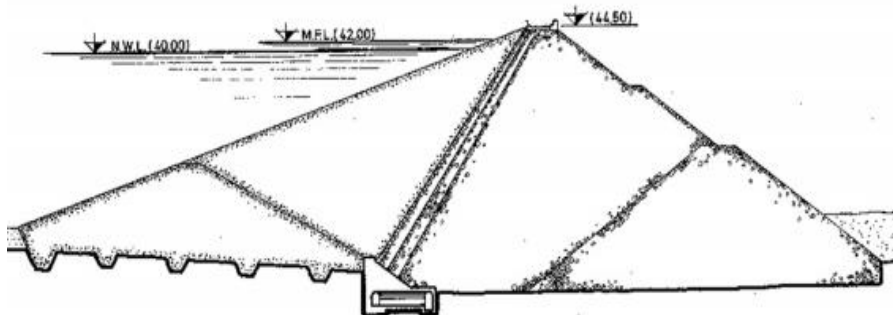


Figura A2.4 - Barragem de terra e enrocamento do Vale do Gaio, Portugal (Adaptado de Melo, 2016).

Devido aos materiais que constituem as barragens de aterro, são conferidas à sua estrutura características de grande ductilidade, podendo estas sofrer grandes deformações sem que a rotura ocorra. Estas, possuem ainda uma grande relação base/altura quando comparadas com os outros tipos de barragens, o que lhes confere maior estabilidade relativamente ao deslizamento.

Assim, pelas razões anteriores, as barragens de aterro são as mais recomendadas no caso de terrenos de fundação de características brandas, permeáveis ou compressíveis. Estas são recomendadas também quando os vales são mais abertos ou largos e quando o custo de materiais como o betão é muito mais elevado (Caldeira & Ramos, 2001).

## Anexo A2.2 - Barragens de betão

As barragens de betão são bastante resistentes devido à sua constituição, mas podem ser vulneráveis no caso de ocorrência de fendilhação, o que leva à sua construção em zonas de vales encaixantes.

Existem diferentes tipos de barragens de betão com interesse para este trabalho:

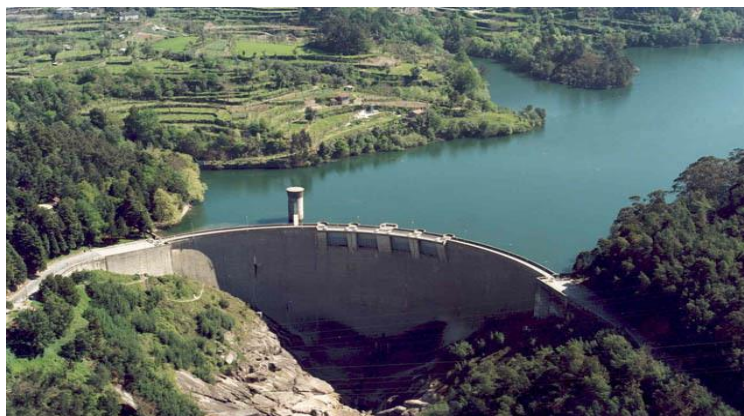
- **Barragens gravidade:** são constituídas por paredões de betão que resistem à impulsão hidrostática devido ao seu peso próprio, o que faz com que este tipo de barragens esteja completamente dependente do seu peso no que diz respeito à estabilidade. O seu perfil gravitacional é essencialmente triangular para garantir a estabilidade e evitar o tensionamento excessivo da barragem ou da sua fundação. Algumas barragens de gravidade são suavemente curvadas no plano por razões, essencialmente estéticas. Estas podem ser de alvenaria de pedra, betão ciclópico (tipo de betão que recorre ao uso de enrocamento de grandes dimensões colocado à mão) ou betão armado;
- **Barragens abóbada:** são construídas em vales apertados, o que permite que a altura seja por vezes maior que o comprimento do corpo da barragem. Têm uma considerável curvatura a montante, funcionando estruturalmente como um arco horizontal, transmitindo a maior parte da carga lateralmente, para os pilares ou para as margens do vale. São, estruturalmente, mais eficientes que as barragens de gravidade ou as barragens de contrafortes, o que reduz bastante as quantidades de betão empregues. Para a sua construção é necessário existirem condições naturais favoráveis como as margens e o fundo do rio serem constituídos por rocha resistente e sã. Podem ser de betão e/ou betão armado;
- **Barragens de contrafortes:** consistem numa face contínua a montante suportada, em intervalos regulares, a jusante, por contrafortes. As barragens de contrafortes maciços são a variante mais moderna no que diz respeito a barragens de betão, podendo ser consideradas como uma versão mais leve das barragens de gravidade;

- **Barragens de abóbadas múltiplas:** são como uma mistura entre as barragens de abóboda e as de gravidade, diferindo apenas na espessura que é menor. Essa limita os esforços de tração, a fim de evitar fissuração. São construídas em betão ciclópico.

Nas Figuras A2.5 e A2.6, observam-se a barragem gravidade do Torrão e a barragem abóbada da Caniçada, respetivamente. A Figura A2.7, mostra a barragem de contrafortes de Pracana. Por fim, a Figura A2.8, mostra a barragem de abóbadas múltiplas da Aguieira.



**Figura A2.5 – Barragem gravidade do Torrão, Portugal**  
([http://www.baixotamega.pt/pages/441/?geo\\_article\\_id=1147](http://www.baixotamega.pt/pages/441/?geo_article_id=1147)).



**Figura A2.6 - Barragem abóbada da Caniçada, Portugal**  
(<http://bomdia.eu/quem-quer-um-terreno-na-barragem-da-caniada/>).





**Figura A2.7 - Barragem de contrafortes da Pracana, Portugal**  
(<http://quintadoribeirinho.pt/en/barragem-da-pracana/>).



**Figura A2.8 - Barragem de abóbadas múltiplas da Aguieira, Portugal**  
(<http://portugalfotografiaaerea.blogspot.pt/2011/08/barragem-da-aguieira.html>).

### **Anexo A2.3 - Barragens de BCC (Betão Compactado com Cilindros)**

As barragens construídas com BCC apresentam propriedades estruturais semelhantes às construídas com recurso a betão convencional. O seu método construtivo consiste na colocação de betão, com reduzida dosagem de cimento e fraca consistência (tipo terra húmida), ao longo de camadas horizontais de pequena espessura, compactando-o com cilindros, como se de um solo se tratasse. Este, dada a sua simplicidade e facilidade de execução, permite obter elevados ritmos de construção bem como poupanças significativas em termos de custos (25% a 50%), quando comparando com a construção de barragens utilizando betão convencional. Por outro lado, a rápida colocação de elevados volumes de betão requerer a execução de análise térmica ao BCC.

A existência de um elevado número de juntas horizontais pode afetar a estabilidade da estrutura e prejudicar o tempo de vida da obra, tornando-a mais suscetível à ocorrência de

percolação. É de notar a difícil execução do método construtivo em espaços reduzidos, bem como o maior impacto na construção aquando da ocorrência de imprevistos. Na Figura A2.9, observa-se a barragem de BCC de Pedrogão.



**Figura A2.9 - Barragem de BCC de Pedrogão, Portugal**  
(<http://www.edia.pt/folder/imprensa/ficheiro/1856.jpg>).

## Anexo A3 – Resultados dos ensaios realizados

Tabela A3.1 - Geomembrana A: força de arranque das soldaduras interiores a diferentes temperaturas.

| Geomembrana A    |      | Força de arranque - Soldadura interior (kN/m) |      |      |      |      |
|------------------|------|---|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 4,8  | 8,9   | 8,7  | 8,8  | 8,7  | 8,5  |
|                  | 7,1  | 8,7   | 7,3  | 9,1  | 8,7  | 8,7  |
|                  | 10   | 8,1   | 10,0 | 10,2 | 8,2  | 10,0 |
|                  | 13,9 | 9,3   | 9,5  | 8,7  | 8,2  | 9,3  |
|                  | 15,9 | 9,1   | 10,0 | 8,9  | 8,5  | 8,5  |
|                  | 19,5 | 6,9   | 7,8  | 7,4  | 8,0  | 7,4  |
|                  | 23,2 | 10,4  | 10,6 | 11,3 | 11,0 | 10,8 |
|                  | 26,8 | 8,5   | 8,9  | 8,0  | 8,0  | 8,0  |
|                  | 30,3 | 8,0   | 8,2  | 8,0  | 8,0  | 7,8  |
|                  | 32,7 | 7,1   | 9,5  | 9,5  | 9,7  | 9,5  |
|                  | 36,6 | 10,6  | 10,2 | 10,2 | 10,8 | 10,6 |
|                  | 40,9 | 6,9   | 7,6  | 7,4  | 7,4  | 7,4  |
| Provetes         |      | P1  | P2   | P3   | P4   | P5   |

Tabela A3.2 - Geomembrana A: força de arranque das soldaduras exteriores a diferentes temperaturas.

| Geomembrana A    |      | Força de arranque - Soldadura exterior (kN/m) |      |      |      |      |
|------------------|------|---|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 4,8  | 8,4   | 9,3  | 9,5  | 9,5  | 8,4  |
|                  | 7,1  | 9,5   | 8,9  | 8,9  | 8,0  | 10,0 |
|                  | 10   | 8,9   | 9,1  | 9,5  | 9,3  | 10,0 |
|                  | 13,9 | 9,3   | 9,3  | 8,4  | 9,7  | 9,3  |
|                  | 15,9 | 9,3   | 9,1  | 10,0 | 8,5  | 8,5  |
|                  | 19,5 | 8,4   | 8,0  | 7,6  | 7,6  | 7,8  |
|                  | 23,2 | 11,5  | 11,4 | 10,6 | 10,8 | 11,3 |
|                  | 26,8 | 8,2   | 8,9  | 8,2  | 8,2  | 8,5  |
|                  | 30,3 | 7,4   | 8,9  | 10,0 | 8,4  | 9,7  |
|                  | 32,7 | 9,7   | 10,2 | 10,4 | 10,2 | 10,6 |
|                  | 36,6 | 10,6  | 10,2 | 10,2 | 10,0 | 10,2 |
|                  | 40,9 | 7,6   | 8,0  | 8,2  | 7,4  | 8,0  |
| Provetes         |      | P1  | P2   | P3   | P4   | P5   |

**Tabela A3.3 - Geomembrana B: força de arranque das soldaduras interiores a diferentes temperaturas.**

| Geomembrana B    |      | Força de arranque - Soldadura interior(kN/m) |      |      |      |      |
|------------------|------|--|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 4,8  | 10,0   | 8,2  | 11,0 | 10,4 | 10,8 |
|                  | 7,1  | 10,6   | 10,8 | 10,2 | 9,5  | 8,9  |
|                  | 10   | 10,4   | 8,9  | 10,4 | 11,2 | 10,4 |
|                  | 13,9 | 9,1  | 9,5  | 10,0 | 10,2 | 10,6 |
|                  | 15,9 | 8,5  | 8,7  | 9,3  | 8,9  | 8,9  |
|                  | 19,5 | 9,3  | 10,2 | 10,4 | 9,5  | 10,2 |
|                  | 23,2 | 11,9   | 11,5 | 11,7 | 11,7 | 11,0 |
|                  | 26,8 | 10,2   | 8,2  | 8,4  | 8,9  | 8,9  |
|                  | 30,3 | 9,5  | 8,2  | 8,5  | 9,1  | 9,3  |
|                  | 32,7 | 11,7   | 10,8 | 10,6 | 10,8 | 10,8 |
|                  | 36,6 | 10,8   | 12,8 | 11,5 | 11,3 | 11,5 |
|                  | 40,9 | 7,8  | 7,8  | 8,9  | 8,9  | 8,0  |
| Provetes         |      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |

**Tabela A3.4 - Geomembrana B: força de arranque das soldaduras exteriores a diferentes temperaturas.**

| Geomembrana B    |      | Força de arranque - Soldadura exterior(kN/m) |      |      |      |      |
|------------------|------|--|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 4,8  | 11,1   | 10,0 | 10,6 | 10,2 | 11,7 |
|                  | 7,1  | 9,1  | 10,4 | 9,8  | 10,4 | 10,6 |
|                  | 10   | 10,8   | 10,3 | 9,8  | 10,2 | 9,5  |
|                  | 13,9 | 8,9  | 8,4  | 9,3  | 9,3  | 10,2 |
|                  | 15,9 | 10,1   | 9,3  | 10,6 | 9,1  | 10,0 |
|                  | 19,5 | 8,7  | 8,2  | 8,9  | 9,3  | 9,5  |
|                  | 23,2 | 11,0   | 11,3 | 11,9 | 11,3 | 11,0 |
|                  | 26,8 | 8,2  | 8,7  | 8,7  | 8,7  | 9,1  |
|                  | 30,3 | 7,8  | 8,2  | 10,0 | 9,5  | 8,0  |
|                  | 32,7 | 11,7   | 11,5 | 11,5 | 10,4 | 11,5 |
|                  | 36,6 | 10,4   | 10,6 | 11,0 | 10,4 | 11,3 |
|                  | 40,9 | 8,7  | 6,9  | 8,7  | 6,9  | 7,2  |
| Provetes         |      | P1   | P2   | P3   | P4   | P5   |

**Tabela A3.5 - Geomembrana C: força de arranque das soldaduras a diferentes temperaturas.**

| Geomembrana C    |      | Força de arranque (kN/m) |      |      |      |      |
|------------------|------|--------------------------|------|------|------|------|
| Temperatura (°C) | 4,8  | 12,6                     | 13,0 | 12,1 | 12,8 | 13,0 |
|                  | 7,1  | 12,1                     | 13,4 | 11,3 | 11,1 | 11,9 |
|                  | 10   | 12,8                     | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 12,8 |
|                  | 13,9 | 12,8                     | 14,5 | 12,3 | 12,8 | 13,2 |
|                  | 15,9 | 12,8                     | 12,6 | 13,2 | 12,8 | 12,8 |
|                  | 19,5 | 11,3                     | 12,4 | 11,9 | 12,3 | 13,0 |
|                  | 23,2 | 14,3                     | 14,5 | 14,5 | 14,5 | 14,3 |
|                  | 26,8 | 12,2                     | 12,4 | 13,8 | 13,9 | 12,6 |
|                  | 30,3 | 11,3                     | 10,8 | 10,8 | 10,4 | 10,8 |
|                  | 32,7 | 14,1                     | 13,9 | 14,5 | 14,5 | 14,5 |
|                  | 36,6 | 13,4                     | 12,8 | 13,6 | 13,2 | 13,0 |
|                  | 40,9 | 11,3                     | 10,8 | 10,8 | 10,6 | 10,8 |
| Provetes         |      | P1                       | P2   | P3   | P4   | P5   |